



LELAND·STANFORD·JVNIOR·VNIVERSITY

Die Entwickelung der Theorien und der Verfahrungsweisen bei der Herstellung der flüssigen Luft.

Von

Prof. Raoul Pictet.

Weimar.
Verlag von Carl Steinert.
1907.

Weimar. — R. Wagner Sohn.

Inhalt.

Einleitung.

Die flüssige Luft wird heute auf allen Universitäten und Polytechniken hergestellt, um der Belehrung und dem Unterricht der Ingenieure zu dienen. Eine Menge von Laboratorien besitzen Apparate, um flüssige Luft zu bereiten, aus welcher in beträchtlichen Mengen und zu billigem Preise der Sauerstoff zu gewinnen ist, der für metallurgische Arbeiten, für die Beleuchtung, für chemische Produkte und auch für die Hygiene so notwendig ist. Infolgedessen hat die flüssige Luft unter den flüchtigen Flüssigkeiten einen hervorragenden Platz gewonnen. Es scheint uns interessant, die natürliche Entwicklung zu verfolgen, welche diese wichtige Frage seit einem halben Jahrhundert genommen hat. Umwandlungen in den Apparaten, Änderungen in den theoretischen Gesichtspunkten, Verbesserungen und Fortschritte in der mechanischen Konstruktion der Kompressoren, Überraschungen aller Art sind die charakteristischen Elemente dieser langen Entwickelung, welche heute der Industrie das wichtigste und nützlichste Gas gibt, das notwendig

ist, um die Fortschritte in der Metallurgie, bei der Erzeugung des Lichtes, in der Hygiene zu sichern. Das Erscheinen des industriellen Sauerstoffes zu einem so niedrigen Preise, daß jede Anwendung möglich wird, ist sicherlich ein Ereignis von hervorragender Bedeutung das mit einem Schlage die Grundlagen der Herstellung hoher Temperaturen verändert, indem es möglich wird, sie zu benutzen, sie zu meistern, sie zu regulieren, um aus ihnen das fruchtbarste, neueste Werkzeug menschlicher Tätigkeit in allen Produktionszentren zu machen.

In dieser Skizze wollen wir nur kursorisch einen Blick auf die ersten Vorgänge werfen, die nur gleichsam Richtstangen und Vorläufer für die gegenwärtige Bewegung gewesen sind. Aber die theoretischen Fragen, welche sich an diese ersten Anstrengungen knüpfen, sind äußerst interessant. Man wird im einzelnen sehen, wie die Wahrheit sich langsam durchringt und allmählich den Nebel zerstreut, der stets jede Erkenntnis bei ihrem ersten Ursprung umhüllt. Die Irrtümer, die Mißerfolge, dann die Fortschritte und die Rückkehr zu richtigerer Auffassung der Gesetze und Erscheinungen, die Vervollkommnung in dem Fabrikationsverfahren der verschiedenen Maschinen, alle diese Ursachen sollen nacheinander in dieser Übersicht der Arbeiten, die zur Ver-

flüssigung der Luft bis auf den heutigen Tag geleistet sind, erscheinen.

Wir wollen also mit einem historischen Überblick beginnen, indem wir die ersten Untersuchungen auf diesem Gebiete heranziehen, dann werden wir eine Analyse der Theorien und eine Beschreibung der Maschinen und Apparate geben, die für die Lösung des Problems ersonnen sind, und werden diesem Kapitel die Anwendungen auf industriellem Gebiet folgen lassen. Wir wollen dann im einzelnen die gegenwärtigen Verfahrungsweisen, ihre Theorie, die Anordnung der Apparate und ihrer Teile und die theoretischen Resultate diskutieren, die man angesichts der schon in der Praxis erhaltenen Resultate erwarten kann.

I. Historisches.

Die Arbeiten von Faraday, Magnus, Regnault, Natterer, Thilorier haben die Kenntnis der flüchtigen Flüssigkeiten bis zur Verflüssigung der Kohlensäure und des Stickstoffoxyduls gebracht. Regnault hat mit der Veröffentlichung seiner gesamten Untersuchungen über die Dampfspannungen der Kohlensäure und des Stickstoffoxyduls eine Meisterleistung vollbracht.

Alle diese oben genannten Physiker haben ausnahmslos das Verfahren angewendet, die

Dämpfe resp. Gase auf einen höheren Druck zu komprimieren und dabei den Behälter, in welchen man die komprimierten Gase eindringen ließ, durch Wasser, Eis oder Kältegemische abzukühlen; die Änderungen der Maximalspannung der Dämpfe als Funktion der Temperatur bestätigten die bereits bekannten Gesetze über die Verflüssigung und erweiterten sie auf schwerer zu verflüssigende Dämpfe, die den Mitteln der Zusammenpressung, über welche man damals verfügte, widerstanden. Alle diese Tatsachen sind so bekannt und im physikalischen Unterricht geläufig, daß wir nicht darauf einzugehen brauchen.

Das war der Zustand der Kenntnisse über diesen Gegenstand im Jahre 1854.

Zu dieser Zeit hatte ein überlegener, theoretischer und praktischer Geist, William Siemens zu Berlin, den Gedanken, ein Patent zu nehmen, um die atmosphärische Luft zu verflüssigen.

Er hatte die bedeutende Abkühlung bemerkt, welche eine Luftmasse erleidet, die sich in einem Zylinder ausdehnt, wenn sie auf einen Kolben wirkt. Indem er diese Abkühlung konstatierte, welche lediglich von der bei der Entspannung des Gases geleisteten Arbeit herrührt, hatte er die Idee, einen Strom komprimierter Luft in einen Luftmotor in der Weise eintreten zu

lassen, daß die komprimierte Luft beim Eintritt in den Motor durch die herauskommende entspannte Luft beständig gekühlt wurde. Hierzu brachte er einen Temperatur-Austauscher auf dem Wege der komprimierten Luft an, die vom Kompressor zum Motor ging, wo die Abkühlung sich vollziehen mußte.

Dieser Austauscher bestand aus drei widerstandsfähigen Röhren, welche die komprimierte Luft enthalten; die aus dem Motor herauskommende Luft umspülte bei ihrem Entweichen diese metallischen Röhren.

Die vom Kompressor zum Motor unter Druck gehenden Luftmassen und die vom Motor zur äußeren Atmosphäre gehenden, durch die Entspannung abgekühlten Luftmassen waren an Gewicht identisch, man durfte also hoffen, daß sie ihre Temperatur sehr vollständig austauschen würden, daß die einen sich in dem Maße, wie sie zum Motor gehen, abkühlten, die anderen auf ihrem Wege in umgekehrter Richtung längs des ganzen Austauschers erwärmten. Hieraus folgte, daß die im Motor wirkende Luft, die sich durch die Leistung äußerer Arbeit auf den Kolben abkühlte, mehr und mehr auch die eintretende Luft abkühlen mußte, so daß diese an der Temperaturerniedrigung der vorhergehenden Massen Teil hatte. Bei jedem Kolbenhube mußte die eintretende Luft kälter sein,

und diese Temperaturerniedrigung wäre theoretisch ohne Grenzen, oder vielmehr die Luft mußte schließlich in einen trägen Staub zerfallen, der unfähig zu irgendwelcher Arbeitsleistung war, oder was wahrscheinlicher war, sie mußte flüssig werden wie die anderen Gase.

Jedenfalls mußte die Abkühlung eine kontinuierliche, proportional der am Kolben geleisteten Arbeit sein, und mußte ohne Möglichkeit eines Irrtums zur Lösung des Problems führen.

In dieser allgemeinen Anordnung zeigt Siemens in theoretischer Beziehung eine wunderbare Klarheit. Zweifellos ist er es, der die menschliche Kenntnis mit der ersten klaren und logischen Darstellung einer mechanischen Anordnung, durch welche die Verflüssigung der sogenannten permanenten Gase möglich wurde, bereichert hat.

Siemens fügte hinzu, daß der Kompressor selbst beständig mit einer neuen Luftmasse bei jedem Hube gespeist werden müsse, um den konstanten Druck aufrecht zu erhalten, unter welchem der Motor arbeiten mußte. Da jeder Kolbenhub eine Temperaturerniedrigung herbeiführte, wäre der Druck beim Eintritt der Luft nach Maßgabe dieser Temperaturerniedrigung gesunken, die Arbeit des Kolbens wäre schwächer geworden, und das allmähliche Er-

löschen der geleisteten Arbeit hätte von selbst das Aufhören der Abkühlung herbeigeführt. Da man aber den anfänglichen Druck trotz der Abkühlung konstant erhielt, so bewahren die logischen Folgerungen von Siemens ihre volle Wahrheit, bis zu dem Luftstaub oder der Verflüssigung der Luft. Wir begrüßen in dem Siemensschen Patent von 1857 das triumphierende Betreten des physikalischen Nordpols.

Unglücklicherweise ist die herriiche Eingebung, dieser schöne Ruf des Aufflugs eines wunderbar klaren und feinen Geistes ein toter Buchstabe geblieben. Siemens war der Stunde der Verwirklichung voraus.

Um zum Nordpol zu gelangen, braucht man Gesundheit, Nahrungsmittel, Hilfsmittel, Kenntnis der Kältegegenden, Hunde ... und ohne all das kommt man zurück, wie all diese kühnen Männer, die diese anziehende von Eismassen wie ein negativer Garten der Hesperiden bewachte Region betreten haben, ohne den Pol zu erreichen.

Siemens ist gescheitert, weil er für diesen mechanischen Kampf nicht ausgerüstet war. Der Wasserdampf der Luft, die Reibung des Kolbens in dem Abkühlungszylinder, die Unmöglichkeit der Ölung, die unzureichenden Oberflächen des Austauschers usw. usw. eine ganze Legion schwarzer Punkte, die ihn unauf-

hörlich bei jedem Versuche umgaben, haben ihn entmutigt; er hat es gemacht wie Nansen, Franklin und ihre Gefährten, er hat sich den Eismassen genähert, dann hat er sich in Stillschweigen zurückgezogen und einen Kampf aufgegeben, für dessen unaufhörlich erneuerte HIndernisse seine finanziellen und materiellen Mittel nicht ausreichten.

Was soll unsere arme, schwache Menschheit tun? Ein durchaus wahrer und richtiger Gedanke des Genies verhüllt sich und wird verdunkelt aus Mangel an materiellen Mitteln, die zu seiner Verwirklichung notwendig sind! Die Wahrheit weicht zurück!

Siemens ist 30 Jahre ohne Nachfolger geblieben.

Um das Jahr 1869 machte Andrews, einer der hervorragendsten Physiker, einen sehr schönen, glücklichen Fund. Er entdeckte den Kritischen Punkt, der allen Flüssigkeiten ohne Ausnahme zukommt.

Er konstatierte, daß, wenn man in zugeschmolzenen, widerstandsfähigen Glasröhren kleine Quantitäten von Flüssigkeiten, die nur etwa den dritten Teil oder die Hälfte des Volumens dieser Röhren bei den gewöhnlichen Temperaturen der Laboratorien einnehmen, erwärmt, daß man dann den Meniskus am oberen Ende dieser Flüssigkeiten sich allmählich ver-

zerren sieht. Nicht nur hob sich der Meniskus nach Maßgabe der Ausdehnung der Flüssigkeit, sondern man sah deutlich die Ränder des Meniskus sich verwischen und plötzlich wurde die freie Oberfläche der Flüssigkeit unsichtbar. Die ganze Röhre war mit Flüssigkeit erfüllt, oder auch die ganze Röhre war von Gas erfüllt.

Die kleinste Änderung der Temperatur, um weniger als $^1/_{100}$° C., verursachte plötzlich einen dichten Nebel in der ganzen Röhre, und die Flüssigkeit nahm wieder ihren Platz im unteren Teil der Röhre ein. Die geringste Erhöhung der Temperatur bewirkte wiederum von neuem das Verschwinden jedes Meniskus.

Die Entdeckung von Andrews ist für das Studium der physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeiten von hervorragender Wichtigkeit, sie bedeutet geradezu einen Wendepunkt in der Geschichte der Thermodynamik. Wir wollen nicht in die weitausgedehnten wissenschaftlichen Diskussionen eintreten, die sich an den Kritischen Punkt und an die Erscheinungen bei den Zustandsänderungen anknüpften. Die einen erklärten, daß hierbei die Dichte des Gases identisch wäre mit der Flüssigkeit, und sich Gas und Flüssigkeit mischten, andere erklärten, daß hier die absolute Grenze zwischen gasförmigem und flüssigem Zustande vorhanden sei usw. usw.

Wie dem auch sei, das Studium des kriti-

schen Punktes der Flüssigkeiten wurde dringend notwendig. Eine Menge von Beobachtern haben zu dieser Zeit die numerische Tabelle entworfen; das Zivilstandsregister jeder Flüssigkeit, wenn man so sagen darf, verlangte diese Konstante.

Zu jener Zeit erschienen eine Reihe wertvoller Arbeiten, die unsere Kenntnis der theoretischen Gesetze der mechanischen Wärmetheorie bereicherten. Die Arbeiten von Lord Kelvin, von v. Helmholtz, Joule, Rankine, Clausius, Briot, Hirn, Zeuner, Bertrand, Montier, Cornu usw. usw. erfüllten die wissenschaftliche Welt mit Bewunderung. Präzise Gesetze vereinigten physikalische Elemente der Körper, die bis dahin für vollkommen unabhängig voneinander gegolten hatten, und schufen ein wissenschaftliches System, dessen Genauigkeit sich dem der Astronomie näherte.

Die Thermodynamik nahm im Unterricht der Universitäten einen hervorragenden Platz ein. Da ich zu jener Zeit meinen Studien oblag, spreche ich noch jetzt mit achtungsvollem Enthusiasmus von meinen Lehrern, die sowohl durch ihre Unterhaltungen, als durch ihren Unterricht alles getan haben, mich auf dem Laufenden über diese neue Wissenschaft zu halten. Bei dieser Gelegenheit weihe ich dem Andenken des Professors Louis Soret, der im

Jahre 1865 in Genf nach seiner Rückkehr von Heidelberg den ersten Kursus über Thermodynamik abhielt, eine herzliche liebevolle Erinnerung. Die Klarheit und Höhe seines Unterrichts nach den Arbeiten von Clausius haben in den Herzen seiner alten Schüler unauslöschliche Eindrücke hinterlassen.

So war der Zustand der wissenschaftlichen Kenntnisse auf diesem besonderen Gebiet der flüchtigen Flüssigkeiten bis zum Jahre 1874.

II. Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Verflüssigung der sogenannten permanenten Gase von 1874—1884.

Von 1868 und speziell von 1870 an verfolgten Cailletet und ich beständig die Lösung des Problems der Verflüssigung der permanenten Gase. Zu dieser Zeit kannten wir uns nicht und verfolgten auf sehr verschiedenen Wegen das gleiche Ziel. Cailletet, der als Hüttenmeister in Côte d'or eine hervorragende Stellung einnahm, hatte sich besonders darauf gelegt, die Verflüssigung der Gase experimentell zu verwirklichen. Er vervollkommnete mit seltener Genialität die Kompressionspumpen für Gase, die in besonders konstruierten Glasröhren auf ein sehr kleines Volumen gebracht wurden. Die Röhren waren im oberen Teile durch ein Kapillargefäß mit sehr wider-

standsfähigen Glaswänden, das aus einem Stahlzylinder voll Quecksilber heraustauchte, abgeschlossen und gestattete die Beobachtung der Verflüssigung unter Drucken von 200 bis 300 Atmosphären. Das durch sehr vollkommene hydraulische Pumpen zurückgedrängte Quecksilber zeigte sich am unteren Ende des sichtbaren Teiles dieser besonderen Röhren, wenn der Druck bereits beträchtlich war. Cailletet hat große Summen auf die Konstruktion dieser Pumpen verwendet, um besonders dichte Stopfbüchsen zu erhalten, um die Glasröhren in den Stahlhüllen einzuschmelzen, ohne Quecksilber durchsickern zu lassen. Die Anordnung der Ventile machte ein sorgsames Studium notwendig. Die Beobachtungen des Druckes und des physikalischen Zustandes der Gase konnten nur von Nutzen sein, wenn diese Drucke konstant waren, nach Belieben modifiziert werden konnten und wenn während der Ablesungen keine zufällige Veränderung der Lage in den Menisken des Quecksilbers und der gebildeten Flüssigkeit ohne ersichtlichen Grund eintreten konnte. Daraus ergaben sich zahllose Versuche über die Konstruktion der Quecksilberpumpen, der Wasserpumpen, der Berührungsflächen der Klappenventile, über die Natur dieser Ventile. Dasselbe war nötig in bezug auf die Beobachtung der Manometer,

bevor sie exakte Angaben bis zu 500—1000 Atmosphären gaben. Schließlich waren zur Bequemlichkeit der Operationen Röhren nötig, die alle Apparate miteinander verbanden. Die Röhren mußten biegsam, fest, dicht, unangreifbar für Quecksilber, Wasser und die zu prüfenden Gasen sein. Alle diese unzähligen Hindernisse rein praktischer Art waren doch Barrieren, die unbedingt überschritten werden mußten, damit man eine nützliche Ernte hoffen konnte, damit man schließlich präzise, unbestreitbare und sichere Resultate erhielt.

Um die verflüssigende Kraft seiner Pumpen zu verstärken, führte Cailletet zwei oder drei Hilfsapparate ein.

1. Eine Pumpe mit Schraube gestattete die Wirkung einer Pumpe mit Hebel fortzusetzen, welch letztere den Druck durch die bloße Anstrengung des Armes auf 300—400 Atmosphären brachte. Wenn man dann langsam die Schraube drehte, steigerte der besondere Kolben von sehr kleinem Durchmesser den Druck bis auf 1000 Atmosphären.

2. Ein Reservoir, welches die aus dem Apparat hervorragende Kapillarröhre umgab, gestattete, dort flüchtige Flüssigkeiten wie schweflige Säure, Äthyloxyd, Chlormethyl, Äthylen usw. usw. hinein gelangen zu lassen. Alle diese Flüssigkeiten sind von 1874—1884 und später

nacheinander in diesem Apparat verwendet worden. Indem man mittels mächtiger Luftpumpen über diesen flüchtigen Flüssigkeiten ein Vakuum herstellte, konnte die Temperatur bis auf —140° erniedrigt werden. Man konnte also bei umgebenden Temperaturen bis zum Sieden des Äthylens unter sehr schwachem Druck das Verhalten aller Gase bei beliebiger Temperatur und beliebigem Druck studieren. Das Gebiet der möglichen Erfahrungen wurde außerordentlich erweitert.

3. Ein Entspannungsventil gestattete, das Quecksilber aus dem zentralen Reservoir in ein äußeres Gefäß entweichen zu lassen.

Die komprimierten Gase wirkten auf den Meniskus des Quecksilbers wie auf einen Kolben und kühlten sich infolge der äußeren Arbeit, die am Quecksilber geleistet wurde, ab. Diese Ursache der Abkühlung war identisch mit der, die Siemens schon im Jahre 1854 in seiner Theorie angegeben hatte. Man sieht daraus, wie sehr das physikalische Problem der Verflüssigung der Gase durch diese ganz neuen ingeniösen Werkzeuge von wahrhaft vollkommener Konstruktion seiner Lösung näher geführt war.

Cailletet veröffentlichte in den Comptes Rendus eine Reihe von Beobachtungen, die mit diesem wunderbaren Apparat während der

Jahre 1874 bis 1878 angestellt wurden. Er verflüssigte auf diese Weise mehrere Gase, welche zwischen den koërzibeln und den sogenannten permanenten Gasen standen.

Am Ende des Jahres 1877, im Dezember, kündigte er der Akademie der Wissenschaften in Paris an, daß er bei der plötzlichen Entspannung von trocknem Sauerstoff von 300 Atmosphären auf atmosphärischen Druck, wobei er die Kapillarröhre mit flüssiger schwefliger Säure kühlte, in diesem Apparat einen Nebel erhielt.

Dies war die bestimmte Verflüssigung des Sauerstoffes, eines bis dahin permanenten Gases.

Von diesem Zeitpunkt an verwandte Cailletet in den folgenden Jahren diesen selben Apparat, aber in seiner Wirkung noch verstärkt durch die Benutzung von Äthylen und besonders von flüssigen Äthylen, das unter schwachem Druck gehalten wurde. Alle permanenten Gase mit Ausnahme des trockenen Wasserstoffs, wurden durch dieses Verfahren verflüssigt, und eine lange Reihe von Notizen in den Comptes Rendus der Akademie der Wissenschaften in Paris hat der wissenschaftlichen Welt die erfreulichen Fortschritte bekannt gemacht, die in diesem Zweig der physikalischen Wissenschaft erreicht wurden.

Zu derselben Zeit hatte auch ich persönlich

das große Glück, meinen kleinen Anteil zu dem von allen meinen Vorgängern und Lehrern so gut begründeten Gebäude beizutragen. Es sei mir gestattet, hier daran zu erinnern, auf welchen ziemlich langen Wegen ich dazu geführt wurde, mich mit diesen Fragen zu beschäftigen, und wie es mir vergönnt war, experimentell dabei mitzuarbeiten, nachdem ich „sehr viele Jahre vor der praktischen Verwirklichung meines Traumes" das theoretische Programm skizziert hatte.

Wenn ich mich bei den Vorbereitungen, von denen ich spreche, etwas länger aufhalte, so geschieht es deswegen, weil es mir namentlich für die Studierenden nützlich erscheint, die leitenden Prinzipien wissenschaftlicher Untersuchungen festzustellen, Prinzipien, aus denen notwendige Programme zur Ausführung in der Industrie entspringen. Diese verschiedenen Etappen des Gedankens und der experimentellen Lösungen, welche sie mit sich bringen, werden hier in einer völlig unpersönlichen Weise zusammengestellt; da sie aber gelebt haben, besitzen sie eine Authentizität, die zu geben mir in der Lage eines Dritten unmöglich sein würde. Das ist der einzige Grund für mich, auf ihre Entwicklung einzugehen.

Im Jahre 1868 hörte ich in Paris den Kursus über Physik bei Jamin in der Polytechnischen

Schule und den Kursus über höhere Mathematik bei Briot in der Sorbonne. Man trug damals zum ersten Male die Ideen von Clausius über die umkehrbaren Kreisprozesse vor. Der von Clausius verbesserte grundlegende Satz von Sadi Carnot gab den Schlüssel des Problems über die Erzeugung der bewegenden Kraft einer Maschine, die lediglich durch die Wirkung der bei einer hohen Temperatur gelieferten Wärme arbeitete. Die Wärme verwandelt sich zum Teil in Arbeit, und der Rest der gelieferten Wärme sinkt auf eine tiefere Temperatur herab, auf der sie bleibt. Eine Dampfmaschine empfängt also im Kessel die Wärmewirkung der Verbrennung der Kohle, und es bildet sich Dampf unter dem Druck von 5, 6 bis 10 Atmosphären. Damals waren Kessel von über 10 Atmosphären selten.

Der Dampf dringt in den Bewegungszylinder ein, leistet äußere Arbeit, die vermittels des Kolbens den mechanischen Teilen, der Pleuelstange, den Transmissionsriemen usw. usw. mitgeteilt wird. Der abgekühlte und auf geringeren Druck gekommene Dampf geht zum Kondensator. Nennen wir:

T' die absolute Temperatur des Kessels,

Q die Menge der dem Kessel gelieferten Wärme, die durch die Menge des unter Druck gelieferten Dampfes dargestellt ist,

T die absolute Temperatur des Kondensators,

F die am Bewegungskolben geleistete Arbeit in Kilogrammeter,

E das mechanische Äquivalent der Wärme, das zu 425 Kilogrammeter für 1 Kalorie angenommen ist,

so gibt der Carnot-Clausius'sche Satz folgende aus dem ersten und zweiten Prinzip der mechanischen Wärmetheorie, deren Begründer sie sind, hergeleiteten Beziehungen:

$$F = Q \frac{T' - T}{T'} E \text{ Kilogrammeter.}$$

Das ist das mögliche Maximum an Arbeit, und die in den Kondensator eintretende Wärme ist:

$$Q \left(1 - \frac{T' - T}{T'}\right) \text{ Kalorien.}$$

Diese klassische Formel war die Darstellung eines umkehrbaren Kreisprozesses, d. h. eines Prozesses, der in beiderlei Sinne verlaufen konnte.

Zu jener Zeit, 1868, hatte man noch in keiner Veröffentlichung analytisch den andren Sinn studiert. Man sprach immer von umkehrbaren Kreisprozessen, aber man hatte sie nur in der damals ganz natürlichen Richtung der Erzeugung von bewegender Kraft studiert.

Es war gerade genau zu jener Zeit, als ich bei Herrn Santter auf dem Marsfelde die ersten

Versuche mit einer Kältemaschine mit Methyläther sah und nunmehr die Formel des Kreisprozesses suchte, der dem durch eine Dampfmaschine gegebenen entgegengesetzt ist. Sie war unfindbar. Ich berechnete sie.

Das Problem war folgendes:

Man liefert einer Dampfmaschine Arbeit in Kilogrammetern, indem man sie ihrem natürlichen Sinne entgegengesetzt sich drehen läßt. Der Bewegungskolben wird ein Saugkolben für die Dämpfe aus dem Kondensator; er treibt sie in den Kessel unter einen höheren Druck zurück, er bewirkt ihre Kondensation im Kessel, und die Speisepumpe des Kessels, welche das kondensierte Wasser in den Kondensator unter geringeren Druck zurücksteigen läßt, wird ein kleiner hydraulischer Motor, der ebensoviel Arbeit wieder leistet, als er im ersten Fall des normalen Ganges verzehrt.

Ich stellte meine Differentialgleichungen auf, integrierte sie zwischen den absoluten Temperaturen des Kessels und des Kondensators und war im ersten Augenblick ziemlich überrascht, die grundlegende Carnot-Clausiussche Gleichung nicht wiederzufinden. In der Tat erhielt ich folgende Gleichung:

$$F = Q \frac{T' - T}{T} E$$

wobei F die der Maschine, die umgekehrt wie

eine Bewegungsmaschine geht, zu leistende Arbeit bedeutet,

Q die dem Kondensator entzogenen und nach dem Kessel gebrachten Kalorien,
T' die absolute Temperatur des Kessels,
T die absolute Temperatur des Kondensators,
E das mechanische Äquivalent einer Kalorie, also 425 Kilogrammeter.

Überdies findet man im Kessel eine größere Wärmemenge als Q. Die gesamte Wärmemenge Q' ist durch die Beziehung gegeben.

$$Q' = Q \left(1 + \frac{T' - T}{T} E\right) \text{ Kalorien.}$$

Diese Gleichungen sind im Grunde nur identisch mit denen des Carnot-Clausius'schen Satzes.

Da der Nenner dieser zur Carnot'schen inversen Funktion T ist, anstatt T', so erkennt man, daß die Diskussion des Problems zu sehr wichtigen Konsequenzen führt.

Je tiefer in der Tat die Temperatur T ist, bei welcher man Wärme entzieht, um so beträchtlicher ist die notwendige Arbeit. Die Kosten einer Kalorie konvergieren nach unendlich, wenn T sich dem absoluten Nullpunkt nähert. Der Nullpunkt ist also eine unerreichbare, der Erfahrung nicht zugängliche Asymptote; er ist der wahre, durch eine unübersteig-

bare Schranke geschützte Nordpol in der Physik.

Alle diese Konsequenzen erschienen mir sehr rasch, auch trat ich in Korrespondenz mit allen Physikern jener Zeit, den Vätern der Thermodynamik, und hatte die Genugtuung, meine Berechnungen nicht nur als exakt hinsichtlich der mathematischen Analyse zugelassen, sondern in allen weiteren Veröffentlichungen angenommen zu sehen. Diesen Bestätigungen verdanke ich die freundschaftlichen Beziehungen mit Lord Kelvin, v. Helmholtz, Clausius, Zeuner, Hirn, Briot, Cornu usw. usw.

Zur selben Zeit entstand die Idee, diese umkehrbaren Kreisprozesse für die Bedürfnisse der Industrie zu verwenden. Ich faßte den Plan einer Kältemaschine mit Schwefligsäure-Anhydrid, eine Flüssigkeit, die zur Kompression der Dämpfe, die sie entbindet, hervorragend geeignete Eigenschaften hat. Bei der Ausführung dieses Gedankens und der beständigen Handhabung der thermodynamischen Formeln kam mir die Konzeption eines neuen Begriffes der Temperatur. Ich erkannte deutlich, daß für jeden Körper die Temperatur die mittlere Amplitude der Wärmeoszillationen der Moleküle dieses Körpers sein mußte. In dieser molekularen Astronomie entsprechen die kritischen Punkte den großen

Axen der Ellipsen der Kometen, die nomadisch oder periodisch sind. Diese beiden Arten trennt nur ein Bruchteil eines Millimeters. Bei einer unendlich kleinen Differenz wird ein festes Molekül flüssig oder umgekehrt. Beim kritischen Punkt wird ein gasförmiges Molekül flüssig für eine Temperaturdifferenz, die unter jede beliebige Grenze der Kleinheit herabsinkt.

Ein ganzes System von Einsichten entwickelte sich aus dieser neuen Definition der Temperatur.

Eine Konsequenz war vor allem nötig, um diesen Begriffen irgendwelche Glaubwürdigkeit zu verschaffen: sie durften bei keinem Versuche über die physikalischen Zustandsänderungen der Körper auf einen grundlegenden Widerspruch stoßen. Es war also notwendig, daß bei einer gewissen Amplitude der Wärmeoszillation die Moleküle aller Gase ohne Ausnahme durch das stabile Gleichgewicht einer geschlossenen Ellipse gingen, dem Durchschnitt, der dem flüssigen und gasförmigen Zustand entspricht. Die Verflüssigung der sogenannten permanenten Gase zeigte sich als absolute Notwendigkeit, sie mußte statt haben, oder das ganze Gerüst von Hypothesen stürzte von selbst zusammen.

Die Verflüssigung der permanenten Gase wurde also ein experimentum crucis, ein not-

wendiges Kriterium, um eine synthetische Konstruktion der Moleküle der festen, flüssigen und gasförmigen Körper annehmen zu können, und besonders, um berechtigt zu sein, sich ihrer bei der Aufstellung der allgemeinen Gleichungen, welche die Wärmeerscheinungen darstellen, zu bedienen. Ich ging also an das Problem der Verflüssigung der sogenannten permanenten Gase, einzig angetrieben von diesen Überlegungen theoretischer Art und fest entschlossen, alles zu versuchen, um eine Reihe von Versuchen, die durch die allgemeinen von der Gesamtheit der zu dieser Zeit bekannten Gesetze vorgeschriebenen Prinzipien verlangt wurden, zu einem guten Ende zu führen.

Ich wurde bei diesen Untersuchungen durch ein glückliches Zusammentreffen unterstützt. Während des Herbstes 1877 hatte ich eine große Zahl Eismaschinen zu konstruieren und konnte daher einige Wochen hindurch Kompressoren benutzen, die für späteren industriellen Dienst bestimmt waren. Ich ließ besondere Apparate aus Stahl, der in Creuzot hergestellt war, anfertigen, welche Drucke von über 1000 Atmosphären aushalten konnten. Ich verband mit diesen Teilen Kondensatoren aus Kupfer, Refrigeratoren, mit einem Wort alles, was nötig war, um das zu erhalten, was man gegenwärtig eine Temperaturerniedrigung

in Stufen nennt. Dank dieser Gesamtheit von Apparaten, die nacheinander und dann parallel in Gang gesetzt wurden, vermochte ich den Sauerstoff in bekannter Masse in einem genau bestimmten Volumen zu komprimieren und den einem genau gemessenen Druck unterworfenen Sauerstoff mittels Kohlensäure und Stickstoffoxydul, die unter einem großen Vakuum gehalten wurden, aut —125° bis —130° Grad abzukühlen. Mit einem Wort, ich verwirklichte den Versuch, dessen allgemeiner Plan den Gegenstand zahlreicher Unterhaltungen im Jahre 1871 mit meinen verehrten Lehrern Regnault und J. B. Dumas gebildet hatte, die beide während dieses schrecklichen Jahres in Genf weilten. Im Monat Dezember des Jahres 1877 stellte ich nacheinander mehrere Versuche an, die mir erlaubten, einige physikalische Elemente des verflüssigten Sauerstoffes festzustellen, die Farbe der Flüssigkeit, ihre Dichtigkeit etc. Ich teilte diese Resultate Herrn J. B. Dumas und meinem Professor und Freunde Herrn A. Wurtz mit. Diese Resultate wurden von diesen Herren in der Sitzung der Pariser Akademie vom 24. Dezember 1877 vorgelesen. Am selben Tage ließ Herr Cailletet ebenfalls zum ersten Male seine Versuche über die Entspannung von trockenem mit Schwefligsäure-Anhydrid gekühltem Sauerstoff mit-

teilen. Unsere Methoden waren durchaus verschieden. Die von Cailletet war die Anwendung der dynamischen Methode, während ich die Verflüssigung dieses Gases durch die statische Methode hatte erhalten können.

Der fundamentale Punkt war erreicht. Es gab keine permanenten Gase mehr. Wenige Tage später ließ Professor Regnault fast schon im Sterben sich ins Institut bringen, um feierlich zu erklären, daß ich ihn über die Pläne aller meiner Versuche seit 1871 unterrichtet hatte; er wollte damit den empörenden Angriffen gegen mich ein Ende machen. Es war dies das letzte Mal, daß er in der Mitte seiner Kollegen das Wort ergriff.

Von diesem Zeitpunkt an, Dezember 1877, vervielfältigten sich die Versuche in gleicher Weise wie die Experimentatoren. In erster Linie ist hier Professor Wroblewski aus Krakau zu nennen. Bei seiner Berufung auf den physikalischen Lehrstuhl der Universität Krakau kam er zu mir und brachte etwa 10 Tage bei mir zu, und wir besprachen alle Versuchsprojekte über die Verflüssigung der Gase, die auf der Theorie der stufenweisen Temperaturerniedrigung beruhten. Wroblewski hat nacheinander mit dieser Methode alle Gase, ausgenommen den Wasserstoff, ver-

flüssigt. Diese Arbeiten sind unbestreitbar sehr vollständig und genau gewesen.

Cailletet hat ebenfalls seine Untersuchungen fortgesetzt, und während zweier Jahre erlebte man ein förmliches Wettrennen zwischen Krakau und Paris. Leider haben diese rein wissenschaftlichen Arbeiten zu bitteren Polemiken über die von der einen und andern Seite bestrittene und behauptete Priorität geführt.

Professor Wroblewski ist gestorben an den Folgen von Brandwunden, die er erhielt, als er versehentlich eine Petroleumlampe umriß, wobei er von den Flammen ergriffen wurde. Er war gerade mit der Abfassung seiner letzten Arbeit beschäftigt. Ein trauriges Ende eines bescheidenen und doch glutvollen und enthusiastischen Gelehrten! Sein Kollege, Professor Olszewski, hat in würdiger Weise den Ruhm dieses historischen Laboratoriums der Universität Krakau fortgesetzt, und erst jüngst noch hatte ich das große Vergnügen, den Apparat in Wirksamkeit zu sehen, durch welchen die Verflüssigung des Wasserstoffes erreicht wird.

Die in den Jahren 1877 bis 1884 erschienenen Arbeiten über die Verflüssigung der Gase sind Legion. Wir zitieren unter andern die in dem Laboratorium von Herrn Hautefeuille in der Sorbonne von den Herren Cailletet, Collandreau, Mathias usw. ausgeführten Versuche,

sämtlich nach den Methoden und mit den Apparaten von Cailletet. Ebenso die Reihe der Arbeiten von Wroblewski, Olszewski usw. in Krakau.

Es würde zu weit führen und unnötig sein, hier alle erschienenen Arbeiten zu erwähnen, denn sie haben nur in einzelnen Monographien die allgemeine Anwendung der Methode, die wir weiter oben in gedrängter Kürze beschrieben haben, bestätigen können. Wir wollen jetzt dazu übergehen, von den Arbeiten zu sprechen, die im besonderen die Verflüssigung der atmosphärischen Luft zum Zweck haben. In der Tat haben diese Arbeiten die Frage in eine ganz neue Richtung gebracht und sie popularisiert, indem sie es möglich machten, zu außerordentlich wichtigen Anwendungen in der Industrie zu gelangen.

III. Versuche über die Verflüssigung der atmosphärischen Luft und der sogenannten permanenten Gase von 1884—1895.

Ich war in den Jahren 1884/95 mehrere Male in Brüssel und hatte dort das seltene Vergnügen, mich sehr lange mit Herrn Solvay zu unterhalten, dem großen belgischen Industriellen, dem Urheber des Verfahrens der industriellen Fabrikation des Ammoniaksodas. Solvay, der mit Interesse die Fortschritte der Thermodyna-

mik verfolgte, besaß nicht genügend Kenntnisse in der höheren Mathematik, um der vollständigen Diskussion der allgemeinen Gleichungen zu folgen. Dagegen beschäftigte er sich mit logischer Klarheit und großer Ausdauer mit den schwierigsten Problemen in ununterbrochenem Nachdenken während langer Monate. In häufigen Unterhaltungen während der Jahre 1884/95 hat mir Solvay sein Programm, um flüssige Luft in großen Mengen zu erhalten, auseinandergesetzt; ohne zu dieser Zeit die Arbeiten von Siemens zu kennen, die seit 1854 vergraben waren, war Solvay zu sehr ähnlichen Ideen gekommen. Sein Verfahren unterscheidet sich fast gar nicht von demjenigen von Siemens. Er ging von dem Prinzip der adiabatischen Entspannung der atmosphärischen Luft aus und nahm an, daß ein normaler Anfangsdruck von 6—7 Atmosphären vollständig hinreichend wäre, um den gewünschten Zweck zu erreichen. Ein Kompressor trieb Massen von Luft, die auf 6—7 Atmosphären komprimiert waren, in ein »Austauscher« genanntes Röhrensystem. Beim Austritt aus diesem Austauscher ging die Luft zu einem Motor mit Verteilungsventil und brachte mechanische Wirkung hervor, Arbeit, die von der im ersten Kompressor zu leistenden Arbeit herrührte. Die Luft kam kälter heraus als sie bei ihrem Eintritt war, und floß

in ungekehrtem Sinne als die komprimierte Luft im Austauscher um Röhren, die sie zum Motor führten. Da diese Abkühlung sich allmählich steigerte, und eine kleine Speisepumpe dazu diente, den Anfangsdruck von 6—7 Atmosphären konstant zu halten, so gab es keinen ersichtlichen Grund, der verhindern könnte, daß die Temperatur der Luft sich bis zum Verflüssigungspunkt erniedrigte.

Wie man sieht, ist dieser Zyklus physikalischer Operationen genau parallel zu dem, den früher Siemens in Berlin ersonnen hatte. 30 Jahre später war die Idee wieder aufgenommen, zurückgeführt durch die Kraft der Tatsachen, durch die Macht der Wahrheit, die unaufhörlich den Gedanken des Menschen auf dem Wege der Entdeckungen vorwärts treibt.

Solvay stellte sehr zahlreiche und kostspielige Versuche an. Er widmete ihnen mehrere Jahre und bedeutende Summen. Unglücklicherweise fehlten einige notwendige Vorsichtsmaßregeln, und alle Versuche und alle Bemühungen, die mit einer eines besseren Erfolges würdigen Ausdauer angestellt wurden, stießen beständig auf die Unmöglichkeit, den Gang der Apparate kontinuierlich zu machen; wenn die Temperatur zwischen — 100° bis — 140° gesunken war, ereignete sich stets irgend

ein Unfall. Bald war es der Schnee und Reif, welcher die Ausgänge verstopfte, dann war es das Bereifen der Kolben, das Öl gefror, so daß die Fettung unmöglich war. Die Metalle wurden spröde, brüchig . . . kurz, nach sehr langen Versuchen war Solvay immer noch überzeugt von der Richtigkeit seiner Methode, aber er wich zurück vor dem Wall von beim Beginn der Arbeit nicht vorhergesehenen Hindernissen, die sich vor ihm auftürmten und ihn durch ihre Häufung erschreckten.

Im Jahre 1895 übergab mir Solvay persönlich eine Denkschrift über seine Theorie zur Verflüssigung der atmosphärischen Luft. Ich sollte diese Herrn Cornu übergeben, der sie mit einigen Entwicklungen über die angestellten Versuche und die Ursachen ihres Mißerfolges dem Institut überreichen sollte. Ein Übermaß von Bescheidenheit bewog Solvay, mich telegraphisch zu ersuchen, seine Denkschrift noch nicht niederzulegen, da er seine Arbeit noch vervollständigen wollte. Sehr gegen meinen Willen bewahrte ich diese Denkschrift einige Monate auf und habe das immer bedauert, denn andere sind inzwischen gekommen und sind mit einer seltenen Nonchalance über ihn hinweg gegangen.

Während der zehn Jahre, von denen wir sprechen, haben eine Menge von Professoren

der Physik sich auf diese so neue und an Beobachtungen aller Art so reiche Spur geworfen.

Im Jahre 1891—92 gründete der Professor der Physik in Leyden ein Laboratorium zum besonderen Studium der tiefen Temperaturen. Da Wroblewski Kamerlingh-Onnes in Leyden besuchte und dies Laboratorium besichtigte, richtete er das seinige auf den methodischen Gebrauch der tiefen Temperaturen in Stufen ein. Nachdem er eine erste Temperaturerniedrigung durch Anwendung eines geschlossenen Zyklus mit Ammoniak oder schwefliger Säure erhielt, kam er in einem Refrigerator zu einer Temperatur von —60° bis —80°; indem er dann Dämpfe von Äthylen, ein Gas, das nach einer sehr genauen Methode hergestellt wird, komprimierte, brachte er sie auf eine Spannung von einigen Atmosphären, etwa 10—20 Atmosphären. Unter diesem Druck drang das Äthylen in eine Schlange, die in den auf —60° bis —80° abgekühlten Refrigerator tauchte, und wurde dort vollständig flüssig, und das flüssige Äthylen geht von da heraus und geht zu dem Luftverflüssiger. Indem man über dem Äthylen ein Vakuum herstellt und die trockene atmosphärische Luft auf einen Druck von 50—80 Atmosphären bringt, verflüssigt man diese vollständig in der besonderen Schlange, die in den Refrigerator des zweiten geschlossenen Zyklus

mit Äthylen taucht. Man kann dann die flüssige Luft in einen kurzen Austauscher herauslassen, dessen Zweck ist, die flüssige Luft abzukühlen, die mit den Gasen herausgeht, welche beim Ausgang aus dem Entspannungsventil entweichen. Ein Teil der verflüssigten Luft wird wieder verdampfen, während die Temperatur der Luft, die flüssig bleibt, sich von selbst auf —194,5° erniedrigt, den Siedepunkt der flüssigen Luft unter atmosphärischem Druck. Die in dieser Weise vergasten Mengen dienen in dem Austauscher dazu, die Temperatur der Flüssigkeit, die ins Innere der Röhren des Austauschers gegen das Regulierventil des Austritts vordringt, zu erniedrigen. Professor Kamerlingh-Onnes vollführte die Verflüssigung der Luft mit einem Apparat, dessen Gesamtkraft etwa 8—10 PS. betrug. Er hat seit seiner Einrichtung flüssige Luft in bemerkenswerten Mengen, etwa 6—8 Liter stündlich gegeben. Alle Universitäten Hollands und selbst die anderer Länder haben flüssige Luft nach dieser Methode sehr reichlich erhalten. Die Veröffentlichungen des Leydener Laboratoriums befinden sich in allen Universitäten, und die Bibliotheken der ganzen Welt enthalten sie. Wir meinen, das Leydener Laboratorium ist die erste Station, welche fortlaufend mehrere Liter flüssiger Luft stündlich herge-

stellt hat. Vom historischen Gesichtspunkt ist diese Tatsache sehr bemerkenswert, denn mit einer Bescheidenheit, die seinem wissenschaftlichen Werte gleichkommt, hat Prof. Kamerlingh-Onnes in Leyden niemals eine Reklame auf Grund dieser herrlichen und schönen Resultate gemacht. Er hat indessen für seine Arbeiten und für die Universität in Leyden die Anerkennung aller Gelehrten erworben, die sich an das Laboratorium wendeten, das er leitet, und wo er sich weit vor den andern die für die wissenschaftlichen Untersuchungen auf dem so fruchtbaren Gebiet der tiefen Temperaturen nützliche Flüssigkeit verschaffte.

Gegen 1890 beschäftigte sich ein junger Professor in Oxford, Dr. Dewar, gleichfalls mit Arbeiten derselben Art; unterstützt mit wichtigen Subsidien mehrerer englischer Städte stellte er mit großer Energie und Ausdauer Untersuchungen an, um in genauer Weise die Konstanten der Flüssigkeit zu erhalten, die man durch die Verflüssigung der ehemals für permanent gehaltenen Gase bekam. Professor Dewar wurde zum Nachfolger des berühmten Tyndall ernannt. Man kann sagen, daß hinsichtlich des wissenschaftlichen Rufes er diese wichtige Nachfolge wohl verdient hat. Die Arbeiten des Professor Dewar sind von Anfang an auf den Temperaturstufen begründet

gewesen. Dank sehr ingenieuser Kombinationen von Apparaten erhielt er in statischem Zustande alle möglichen flüchtigen Flüssigkeiten, einschließlich den Wasserstoff, über den er eine geradezu klassisch und berühmt gewordene Monographie veröffentlichte. Er studierte in einer ununterbrochenen Reihe von Arbeiten eine Menge neuer Erscheinungen, Erscheinungen der Wärmeleitung und der elektrischen Leitung der Metalle, Erscheinungen der Fluoreszenz und Phosphoreszenz gewisser Körper, die tiefen Temperaturen unterworfen wurden, Absorption der Gase durch gewisse Körper z. B. die Kohle.

Einer der Ruhmestitel des Professor Dewar war, die isolierende Eigenschaft eines großen Vakuums mit Bezug auf die Durchlässigkeit der Wärme zu finden und nachzuweisen. Indem er Flaschen mit doppelten konzentrischen Wänden konstruierte, in denen er ein möglichst vollkommenes Vakuum herstellte, gelang es ihm, die Laboratorien und den Handel mit tragbaren Apparaten zu versehen, in denen man 1—5 Liter flüssige Luft transportieren und fast 3 Wochen lang ohne einen anderen Schutz als eine auf die innere Oberfläche der äußeren Wand aufgetragene Versilberung aufbewahren kann. Durch das Erscheinen dieser förmlichen Wunder aus Glas ist das Studium auf dem Gebiete

der tiefen Temperaturen derartig erleichtert worden, daß man ohne Übertreibung sagen kann, daß eine neue Ära für alle Physiker angebrochen ist; denn man hat flüssige Luft erhalten und sie über große Entfernungen nach allen Laboratorien der Welt transportieren können, ohne hierfür die beträchtlichen Ausgaben für die Apparate, die zur Herstellung der flüssigen Luft notwendig sind, auf sich nehmen zu müssen. Ich habe selbst vor zwei Jahren die in Manchester fabrizierte flüssige Luft transportiert und mich mit ihr nach Paris, nach Zürich, nach Berlin zur Anstellung von Versuchen begeben. Mit 5 Liter Luft in einer großen Flasche reiste ich ab, und hatte 22 Tage nach meiner Abreise noch mehr als einen Liter zur Verfügung.

Das Laboratorium des Professor Dewar ist eines der bedeutendsten und tätigsten in Europa und hat beträchtlich zur Erweiterung der Kenntnisse der flüchtigen Flüssigkeiten, ihrer Eigenschaften und Anwendungen, beigetragen.

Außer den während dieser Dekade von 1884—1894 neu gegründeten Laboratorien und den bemerkenswerten Arbeiten, die von ihnen ausgingen, haben eine Menge von Physikern auf den verschiedenen Universitäten ihre Beiträge zu diesem ungeheuren Gebiete geliefert, das sich mit großer Schnelligkeit auf einem

für Erfindungen äußerst günstigen Terrain erhoben hat. Indessen kam keine wichtige Modifikation in den Methoden und Apparaten hinzu bis zum Jahre 1895/96, dem Augenblick, wo Professor v. Linde aus München seine sensationellen Mitteilungen in Aachen und in dem Verein der Ingenieure in Berlin machte. Wir wollen jetzt zu diesen übergehen, denn sie bieten für den Gegenstand, der uns beschäftigt, ein ganz besonderes Interesse dar.

IV. Die Theorie der Apparate des Professors v. Linde.

Im Jahre 1895 sprach auf der Versammlung deutscher Ingenieure in Aachen Professor Schröter vom Polytechnikum in München über die neuesten Arbeiten des Professors v. Linde in München, der durch seine Kälteapparate wohl bekannt war, und kündete mit Unterstützung von experimentellen Darstellungen an, daß Professor v. Linde soeben ein Verfahren zur Herstellung flüssiger Luft in größerem Maßstabe entdeckt habe. Die Theorie der physikalischen Operationen, auf welchen die Herstellung der flüssigen Luft beruhte, hatte nach der Darstellung des Redners keinen gemeinsamen Punkt mit den früheren gänzlich ungenügenden Ausführungsweisen, die nach dem Redner vollständig unbrauchbar für die industriellen Bedürfnisse waren. Man erhielt die

flüssige Luft direkt durch einfache Kompression auf hohen Druck von 200—250 Atmosphären, indem man dann diese Luft sich entspannen ließ ohne irgend einen anderen mechanischen Apparat. Die Luft kühlte sich ab einzig durch die Tatsache der inneren Arbeit. Indem man plötzlich von 200 Atmosphären auf 1 Atmosphäre herabging, kühlte sich die Luft spontan, ohne irgend welche äußere Arbeit, ohne irgend einen Motor ab. Man wandte auf die Erscheinung eine Formel an, die vor einem halben Jahrhundert von Lord Kelvin, damals Professor W. Thomsen in Glasgow, gegeben war. Diese Formel hatte übrigens einen empirischen Charakter und entsprach weder in bezug auf den Druck noch auf die Temperaturen denen der Apparate, für welche man sie anwandte. Prof. Schröter berichtete über die in München gemachten Erfahrungen und zeigte die mit dem Apparat erhaltene flüssige Luft. Jedermann war entzückt, überzeugt und begrüßte diese Theorie als eine Umwälzung auf dem Gebiet der tiefen Temperaturen, ebensowohl durch die Neuheit der befolgten Methoden als durch die Wichtigkeit der materiellen Resultate, wonach die so erhaltene flüssige Luft direkt zur Herstellung von Sauerstoff für die Bedürfnisse der Industrie nutzbar werden sollte.

Bei den möglichen Anwendungen der flüssi-

gen Luft wußte man schon seit langem, daß der Sauerstoff weniger flüchtig ist als der Stickstoff. Wroblewski, Dewar, Cailletet, Matthias, Olszewski und mehrere andere hatten die Siedepunkte des reinen Stickstoffs und des reinen Sauerstoffs angegeben. Wenn man flüssige Luft destilliert, so wird zuerst der Stickstoff frei und verläßt den in der Flüssigkeit verbleibenden Sauerstoff. Herr v. Linde nahm ein Patent, in welchem er entgegen den Arbeiten aller seiner Vorgänger, die er anführt, den Schutz für sein Verfahren verlangt, das nur auf der Anwendung der inneren Arbeit der auf hohen Druck, etwa 200 Atmosphären, komprimierten atmosphärischen Luft, die sich ohne äußere Arbeit entspannt, beruht. Er setzte sich also in offenen Gegensatz mit den Prinzipien von Siemens, Solvay, mir usw.

Während etwa 9 Jahren ist diese Theorie des Professors v. Linde auf allen Universitäten gelehrt worden. Die Patente auf seine Maschine und sein Prinzip sind als Verfahren-Patente bewilligt worden. Niemand hat in Denkschriften oder in Vorträgen widersprochen, analysiert oder auch nur versucht, die neuen auf den Behauptungen zweier Professoren und auf der Vorweisung von flüssiger Luft beruhende Theorie zu verifizieren. Die Linde - Gesellschaft in München hat mehrere 100 Maschinen in Europa

verkauft, sowohl speziell für Laboratorien und Universitäten wie an Unterrichtsinstitute. Man findet diesen Apparat heute fast überall, also fast alle Professoren der Physik in Europa und Amerika haben diesen Apparat in Funktion sehen oder setzen können.

Nun ist aber heute evident, daß die ganze Theorie von v. Linde bezüglich dieser Maschine und ihres Prinzips ein phantastischer Irrtum gewesen ist. Es bleibt auch nicht eine Silbe mehr von diesem stolzen wissenschaftlichen Gebäude bestehen. Die Maschine dagegen fährt fort, mehr oder weniger gut zu funktionieren, und ist in den meisten Laboratorien durch die noch einfachere und in ihrem Funktionieren schnellere und sichere Hampson-Maschine ersetzt.

Wir wollen in einigen Worten die Theorie der Linde-Maschine zur Herstellung flüssiger Luft, so wie sie vom Urheber selbst dargestellt wird, auseinandersetzen.

Man komprimiert Luft bis auf einen Druck von etwa 200 Atmosphären mittels zwei oder drei hintereinander geschalteter Kompressoren. Die Kompressionswärme wird durch einen Wasserstrom aus einem Brunnen weggeführt, in welchen eine von der komprimierten Luft durchschrittene Schlange taucht. Einmal abgekühlt, wollen wir diese Luft als trocken und von

Kohlensäure befreit voraussetzen, um die Auseinandersetzung zu vereinfachen. Man läßt diese komprimierte Luft in eine innere Schlange eindringen, die sich in der Achse einer zweiten Schlange befindet, welche sie von allen Seiten umgibt. Um diese Doppelschlange zu konstruieren führt man eine Röhre von kleinem Durchmesser, etwa 1 cm, in eine Röhre von größerem Durchmesser, etwa 3 cm. Die kleine Röhre wird in der Achse der zweiten Röhre gehalten. Nachdem dies geschehen ist, rollt man diese beiden konzentrischen Röhren in Spiralen auf, die so einen vertikalen Zylinder bilden. Die auf 200 Atmosphären komprimierte Luft tritt nun in die zentrale Röhre und steigt in der inneren Windung nach unten. Dort hat man am unteren Ende ein nach Belieben regulierbares Entweichungsventil angelötet. Die Luft entweicht von diesem Druck auf atmosphärischen Druck in einen kleinen Ballon aus Kupfer, und da dieser Ballon durch Lötung mit dem äußeren Ende der Spirale verbunden ist, so wird die entspannte Luft inzwischen wieder von unten nach oben in dem ringförmigen Raum aufsteigen, der sich zwischen den beiden Schlangen befindet. Beim Herauskommen wird die Luft wieder von den Kompressoren aufgenommen, um von neuem komprimiert zu werden und denselben Kreislauf zu beginnen.

Der Apparat ist also lediglich aus vier getrennten Teilen zusammengesetzt:

1. Eine Gruppe von Kompressoren, die eine Luftmasse auf 200 Atmosphären zu komprimieren vermögen.

2. Eine Kühlschlange, die bestimmt ist, die Kompressionswärme der Luft fortzunehmen.

3. Eine Doppelschlange, die gleichzeitig der komprimierten Luft gestattet, von oben nach unten zu strömen, und der entspannten Luft, in dem ringförmigen Raum von unten nach oben zu strömen.

4. Ein nach Belieben regulierbares Entspannungsventil, um den Druck und den Verbrauch an Luft konstant zu halten.

Dies ist alles, wenigstens für die erste Demonstration des Prinzips.

Herr v. Linde sagt: „Die auf 200 Atmosphären komprimierte Luft hat innere Arbeit aufgespeichert, durch welche sie im Moment der Entspannung zu einer Temperaturerniedrigung gebracht wird. Diese innere Arbeit hat die Wirkung der latenten Wärme, welche Wärme absorbieren wird, sobald der Druck nicht mehr konstant gehalten wird. Irgend welche äußere Arbeit wird nicht geleistet werden. Die Temperaturerniedrigung geschieht nur auf Kosten der Wärmeabsorption zufolge dieser inneren Arbeit.“ Das Exposé von Linde, Schröter und

der Inhalt der Patentschriften sind über diesen Gegenstand durchaus deutlich. Die charakteristische Eigentümlichkeit dieses Systems ist die alleinige Anwendung der inneren Arbeit der komprimierten Gase mit Ausschluß jeder äußeren Arbeit. Zur Unterstützung dieser Behauptung gibt Herr v. Linde die Joule-Thomsensche Formel, welche lautet:

$$\Theta^{0} = 0.276\,(P-p)\left(\frac{273}{t}\right)^{2}$$

wobei

Θ^{0} die Temperaturerniedrigung der Luft nach der Entspannung in Graden der hundertteiligen Skala,

P den höheren Druck vor der Entspannung in Atmosphären,

p den Druck in Atmosphären nach der Entspannung,

t die absolute Temperatur der Gase vor der Entspannung,

273 die absolute Temperatur von 0° C.

bedeutet.

Da Herr v. Linde angibt, daß man den Druck bis auf 250 Atmosphären erhöhen kann, um eine beträchtlichere Wirkung zu erhalten, so wollen wir diesen Druck annehmen, um die Konsequenzen seiner Theorie bei dem wirklichen Funktionieren der Maschine zu verfolgen und alle für ihren Betrieb angeführten Vorteile in

Betracht zu ziehen. Wir wollen zuerst die Temperatur 0° C. annehmen, um eine erste Entspannung auszuführen. Wir ersetzen also in der Formel die Buchstaben durch folgende Zahlen:

Θ^0 gleich der gesuchten Temperaturerniedrigung in Angaben der hundertteiligen Skala,

P = 250 Atm.

p = 1 Atm.

t = 273°.

Es wird dann:

$$\Theta = 68{,}7^\circ \text{ C.}$$

Nach dem Erfinder v. Linde entweicht also die Luft bei einer um 68,7° geringeren Temperatur als sie vor dem Entspannungsventil hatte. Da diese Luft welche die Temperatur —68,7° erreicht hat, wenn sie mit 0° in den Apparat eingeströmt ist, wieder in dem Austauscher heraufsteigt gegen eine ihr an Gewicht gleiche Masse Luft, so tauschen diese beiden Luftmassen ihre Temperaturen aus, wenn man den Austauscher als vollkommen voraussetzt. Also kommt nach einiger Zeit in der Tat die komprimierte Luft oberhalb der Entspannung, d. h. gerade bevor sie in das Entspannungsventil übergeht, mit einer Temperatur von —68,7° an, und nehmen wir von neuem in der Formel für t° den Wert der Temperatur vor der Entspannung an, so wird die Formel:

$$\Theta^0 = 0.276\,(250-1)\left(\frac{273}{273-68.7}\right)^2$$

woraus sich ergibt:

$$\Theta^0 = 122.7^\circ.$$

Da die Temperaturerniedrigung in diesem Falle 122,7° beträgt, und da die Temperatur der Luft vor der Entspannung —68,7° ist, so ergibt sich, immer nach v. Linde, daß die Temperatur der Luft nach der Entspannung werden müßte.

$$t = -68.7^\circ + (-122.7^\circ)$$

also $$t = -191.4^\circ \text{ C.}$$

Diese kalte Luft steigt wieder im umgekehrten Sinn, wie die komprimierte Luft auf, und da die Luft sich bei —194,5° unter Atmosphärendruck verflüssigt, so sieht man sofort, daß beim Herauskommen aus dem Entspannungsventil ein starker Teil der komprimierten Luft seinen Zustand schon geändert haben muß und flüssig herauskommen wird. Die Kompressoren haben die Luft beim Herauskommen aus dem Austauscher wieder zu komprimieren und sie wieder auf 250 Atmosphären zu bringen.

Hier greift nun eine sehr interessante und ebenso neue Besonderheit der Erfindung des Herrn v. Linde Platz. Anstatt die Luft von 250 Atmosphären auf atmosphärischen Druck sich entspannen zu lassen, läßt er sie nur bis auf 15 oder 20 Atmosphären herabsinken. Zufolge dieser geistvollen Kombination wird die Arbeit

der Kompressoren stark vermindert, während die aus der Formel sich ergebende Temperaturerniedrigung kaum verändert wird. Um diesen Punkt recht deutlich zu machen, wollen wir das Minimum der Kompressionsarbeit berechnen, das verbraucht wird, um V Liter Luft von einer Atmosphäre auf 250 Atmosphären zu komprimieren und die entsprechende Temperaturerniedrigung bei der Entspannung von 250 auf eine Atmosphäre. Wir wollen dann die Rechnung noch einmal für dieselbe Luftmasse durchführen, wenn sie von 20 auf 250 Atmosphären komprimiert wird, und die Formel anwenden, um die Temperaturerniedrigung der Luft bei der Entspannung von 250 auf 20 Atmosphären zu erhalten. Man findet folgende Resultate:

Kompressionsarbeit für VLiter, die von 1 Atm. auf 250 Atm. gebracht werden, gleich

$$V \times 10.33 \lg_{nat} \left(\frac{250}{1}\right)$$

also gleich 57 Kilogrammeter pro Liter.

$$\Theta^{0} = 68.7^{0} \text{ C.}$$

Kompressionsarbeit für VLiter, die von 20 Atm. auf 250 Atm. gebracht werden

$$V \times 10.33 \lg_{nat} \left(\frac{250}{20}\right)$$

also gleich 26.01 Kilogrammeter pro Liter.

$$\Theta^{0} = (250-20) \times 0.276 \times \left(\frac{273}{t}\right)^{2}$$

also für t=273°, das ist 0° C., hat man

$$\Theta^{\circ} = 63.5^{\circ}.$$

Also sagt v. Linde: Wenn ich mich darauf beschränke, bis auf 20 Atmosphären zu entspannen, so spare ich per Liter komprimierter Luft (bezogen auf Atmosphärendruck)

$$57 - 26{,}09 = 30{,}91 \text{ kgm.}$$

während ich zufolge der Entspannung nur verliere:

$$68{,}7^{\circ} - 63{,}5^{\circ} = 5{,}2^{\circ} \text{ C.}$$

Um diese geistvolle Kombination anzuwenden, konstruiert v. Linde eine dritte Hülle an dem beschriebenen Austauscher, der also dann aus 3 konzentrischen Röhren besteht. Er läßt dann die Luft von 20 Atmosphären auf eine Atmosphäre sich in dem ringförmigen Raum zwischen dem 1. und dem 2. ringförmigen Raum entspannen, und diese letzte Entspannung vervollständigt und beschleunigt die Verflüssigung der Luft, die mit der ersten Entspannung begonnen hat.

Hinzuzufügen ist noch, daß ein kleiner besonderer Kompressor beständig neue Luft zur allgemeinen Zirkulation hinzuführt, um die Luftverluste zufolge der teilweisen Verflüssigung der Luft während der beiden aufeinander folgenden Entspannungen auszugleichen.

Wenn man also dem Erfinder folgt, so vollziehen sich alle Erscheinungen der Kompression

und der Entspannungen, der ersten bis auf 20 Atmosphären und der zweiten bis auf eine Atmosphäre, in geschlossenem Raume, und es kommt nur die innere Arbeit der komprimierten Luft ins Spiel. Die fortschreitende Abkühlung der Luft überträgt sich auf die komprimierte Luft, welche ankommt, und allmählich stellt sich ein Zustand des Betriebes her, bei welchem die Verflüssigung, wobei die latente Kondensationswärme der sich verflüssigenden Luft absorbiert wird, genau das Gleichgewicht hält zu der inneren Arbeit der außen komprimierten Luft. Die Maschine arbeitet dann mit normalem Gange und liefert etwa 350—400 gr flüssige Luft per P.S. Stunde.

Das ist in ihren charakteristischen Zügen die neue Methode des Professors v. Linde. Es ist absolut unbestreitbar, daß die Maschine außerordentlich einfach ist. Sie nimmt nicht viel Raum ein und erfordert nur solide Kompressoren und widerstandsfähige Schlangen. Jedermann und wir an allererster Stelle haben die Großartigkeit dieser Demonstration und ihre große Einfachheit im Gegensatz zu den Komplikationen, die mit den Temperaturstufen verbunden sind, begrüßt. Bei den geschlossenen Zyklen muß man verschiedene flüchtige Flüssigkeiten anwenden, sowie mehrere parallel laufende Kompressoren und überdies die Luftkompres-

soren. Hier ist nichts ähnliches mehr, keine geschlossenen Zyklen mehr. Man komprimiert Luft auf starken Druck, man läßt sie sich entspannen, und man hat flüssige Luft.

Nachdem wir der Einfachheit der Maschine den gerechten Tribut an Lob gezollt haben, ist es gestattet, die von dem Erfinder vorgebrachte Theorie zu diskutieren. Diese Diskussion ist so einfach, in ihren Schlußfolgerungen so evident, daß man ganz erstaunt darüber bleibt, daß bisher kein erläuternder Aufsatz aus der autorisierten Feder der Herren Professoren Schröter und v. Linde veröffentlicht ist, um ihre ersten Behauptungen zu modifizieren. In der Tat bildet dies alles ein fast einzig dastehendes Vorkommnis in der Geschichte der Wissenschaft!

Ich gehe jetzt dazu über, die wirklichen Ursachen zu zeigen, welche in der Maschine v. Linde die Herstellung von flüssiger Luft bewirken.

Physikalische Theorie der Linde-Maschine zur Erzeugung flüssiger Luft. Wir wollen uns zuerst daran erinnern, daß man zufolge der Arbeiten von Regnault und Amagat, welch letzterer nach den Versuchen von Natterer in Wien weitere Versuche anstellte, ohne erhebliche Fehler die atmosphärische Luft als eines der Gase betrachten kann,

die sehr streng das Gesetz von Mariotte und Gay-Lussac bei den gewöhnlichen Temperaturen bis zu dem hohen Druck von 200—250 Atmosphären befolgen. Hieraus folgt vor jeder anderen Betrachtung, daß beim Komprimieren der Luft auf 250 Atmosphären das Wasser des Reservoires, welches die Kompressionswärme fortführt, nur Kompressionswärme ohne irgend eine Spur von latenter Kondensationswärme wegnimmt. Jede Kondensation würde eine größere Kompressibilität des Gases herbeiführen als nach dem Mariotteschen Gesetz, und bei der Luft zeigt es sich gerade ein wenig umgekehrt. Folgende Tabelle beweist deutlich, daß oberhalb 150 Atmosphären die Luft die Neigung hat, sich dem Verhalten des Wasserstoffes zu nähern. d. h. sich weniger zu komprimieren, als das Mariottesche Gesetz verlangt. Diese erste Beobachtung macht uns sofort stutzig über eine Hypothese, die auf der freiwilligen Erscheinung einer Wärme absorbierenden inneren Arbeit während der Entspannung der komprimierten Luft beruht.

Aber ohne uns bei diesen Überlegungen aufzuhalten, die allerdings den Physiker leiten müssen, wollen wir genau zusehen, was in der Linde-Maschine vorgeht.

Wir nehmen ein Volumen von 100 Litern vollkommen trockener Luft an. Wir kompri-

mieren sie in einem idealen Kompressor isothermisch, ohne irgendwelche Reibung. Das ergibt das Maximum das Nutzeffektes. Man erhält als Arbeit der Kompression:

$$V.P. \log \left(\frac{P'}{p}\right) \text{ Kilogrammeter.}$$

V = 100 Liter

P = 10,33 pro Liter, eine Konstante des Integrals.

P' = 250 atm.

p = 1 atm.

Arbeit = 5704 Kilogrammeter.

Wenn wir annehmen, das alles bei 0° C. geschieht, wird das Kühlwasser an Kompressionswärme absorbieren

$$\frac{5704}{425} = 13{,}4 \text{ Kalorien.}$$

Die bei 0° komprimierten und einem Druck von 250 Atmosphären unterworfenen 100 Liter werden nur noch ein Volumen V' Liter einnehmen, das beträgt:

$$V' = \frac{100}{250} = 0{,}4 \text{ Liter.}$$

Wenn diese Masse von komprimierter Luft zur Entspannung kommen und hinter dem Austrittventil entweichen wird, würde sie genau ihr ursprüngliches Volumen annehmen, wenn es nicht irgend eine äußere Arbeit zu leisten gäbe. In der Tat wirkt die äußere atmosphärische Luft beständig hinter dem Ausflußventil der Gase. Der atmosphärische Druck wird durch

diese Luft, welche spontan ihr Volumen vergrößert und sie zurückzuweichen zwingt, zurückgedrängt.

Wir wollen annehmen, daß man einen Kautschukballon von 50 Liter Inhalt aufbläst. Vor der Entspannung wird dieser Ballon platt gemacht. Nach der Entspannung beträgt das Volumen 100 Liter, vermindert durch die Volumreduktion dieser Gase zufolge der Temperaturerniedrigung, welche durch diese äußere Arbeit hervorgerufen ist. Der molekulare Sturm, welcher in der Öffnung selbst des Ventils wütet, gibt den Luftmolekülen beträchtliche Beschleunigungen, aber diese Geschwindigkeiten erlöschen sehr schnell, und jedes Molekul stellt in der Form von lebendiger Kraft und von Stößen die Energie wieder dar, welche es während seines Austritts angehäuft hat.

Diese Wirkungen kompensieren sich! Was sich nicht kompensiert, ist die äußere Arbeit, welche durch das Zurückdrängen des in dem Entspannungsraume herrschenden Druckes verursacht wird. Wir können sie berechnen und in präziser Weise die durch diese äußere Arbeit veranlaßte Temperaturerniedrigung messen.

Das geschieht folgenderweise:

Es sei

$V = 100$ Liter des wirksamen Gases bei 0°.

$P' =$ der Anfangsdruck $= 250$ atm.

E = das mechanische Äquivalent der Wärme, = 425,

c = die spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck = 0,23751,

1,293 = das Gewicht von 1 cbm Luft bei 0°,

273° = die absolute Temperatur des Nullpunktes der hundertteiligen Skala,

10,33 Kilogramm = der atmosphärische Druck,

Θ = die Temperaturerniedrigung der Luft zufolge der Entspannung.

Durch Anwendung der elementaren Formeln der Physik erhalten wir:

$\frac{V}{P'}$ = Volumen der auf 250 Atm. komprimierten Gase.

$V \cdot \frac{273 - \Theta}{273}$ = Volumen der Gase nach der Entspannung.

$V \frac{273 - \Theta}{273} - \frac{V}{P'}$ = Volumvermehrung der Gase während der Entspannung.

$\left[V \frac{273 - \Theta}{273} - \frac{V}{P'}\right] 10{,}33$ = Äußere während der Entspannung geleistete Arbeit.

$V \times 1{,}293 \times 0{,}23751 \times \Theta$ = in äußere Arbeit verwandelte Wärme.

Wir erhalten also folgende elementare Gleichung, die das gesamte Phänomen der Entspannung darstellt:

$$V\left(\frac{273-\Theta}{273}-\frac{1}{P'}\right)10{,}33 = V \times 1{,}293 \times 0{,}23751 \times 0{,}425 \times \Theta$$

und hieraus erhalten wir für Θ^0 den numerischen Wert: $\Theta^0 = 61{,}1^0$.

Also erniedrigt die Luft bei ihrem Entweichen nach außen aus dem Entspannungsventil ihre Temperatur um 61,1° zufolge der geleisteten äußeren Arbeit, und keineswegs zufolge irgendwelcher durchaus imaginären inneren Arbeit.

Aber wir wollen das Problem weiter verfolgen. Die abgekühlte und entspannte Luft steigt in dem Austauscher wieder auf und wird die Abkühlung der komprimierten Luft bewirken. Wir wollen in derselben Weise wie soeben bei 0° berechnen, wieviel die Abkühlung beim kritischen Punkt der Luft, also bei —141° C. oder 132° absolut betragen wird.

$\dfrac{V \cdot \frac{132}{273}}{P'}$ = Volum der Gase vor der Entspannung.

$\dfrac{V \frac{132-\Theta}{273}}{1}$ = Volum der Gase nach der Entspannung.

$V\left(\frac{132-\Theta}{273}-\frac{132}{P' \times 273}\right)10{,}33$ = äußere, während der Entspannung geleistete Arbeit.

$V \times 1{,}293 \times 0{,}23751 \times 0{,}425 \times \Theta^0$ = in äußere Arbeit verwandelte Wärme

Hieraus ergibt sich die Gleichung:

$$\Theta^{\circ} = \frac{10{,}33 \times 132 \left(1 - \frac{1}{P}\right)}{10{,}33 + 273 \times 1{,}293 \times 0{,}23751 \times 0{,}425}$$

das ist $\Theta^{\circ} = 29^{\circ}{,}5$

Die Entspannung wird fortgesetzt und die Luft kühlt sich mehr und mehr ab. Bei — 194,5°, dem Verflüssigungspunkt der Luft angekommen, wird der Wert von Θ°

$$\Theta^{\circ} = \frac{10{,}33 \times 78^{\circ}{,}5 \times \left(1 - \frac{1}{P}\right)}{10{,}33 + 273 \times 1{,}293 \times 0{,}23751 \times 0{,}425}$$

das ist $\Theta^{\circ} = 17^{\circ}{,}6$.

In dem Maße also, wie die komprimierte Luft sich vor der Entspannung abkühlt, wird die Temperaturerniedrigung zufolge der Entspannung geringer; denn das Volumen der Gase nach der Expansion vermindert sich proportional mit der absoluten Temperatur der Gase nach der Expansion. Alle mit der Linde-Maschine, die mit Wasserstoffthermometern oder mit Thermoelementen versehen wurde, angestellten Versuche bestätigen numerisch alle diese Zahlen bis zu dem Punkt, bei welchem die teilweise Verflüssigung der Luft in der zentralen Schlange den Gang durch das Auftreten latenter Wärmen, die ins Spiel kommen, modifiziert, weil dadurch die Gase, die sich der Entspannung vor dem Ausströmungsventil nähern, wieder erwärmt werden. Diese Resultate sind von allen denen

festgestellt worden, welche den Linde-Apparat in Funktion gesehen oder ihn selbst in Funktion gesetzt haben.

Wir wollen nun das seit 9 Jahren beständig erneuerte Erfahrungsresultat mit der von dem Erfinder v. Linde gelehrten Theorie vergleichen. Die Temperaturerniedrigung, die sich nach der vom Erfinder angegebenen Formel ergibt, wollen wir in die 2. Kolumne setzen, die wirklich beobachtete Temperaturerniedrigung in die 3. Kolumne:

Temperatur der Gase vor der Entspannung	Θ^0 nach der von Linde benutzten Formel	Θ^0 nach den Beobachtungen
0° C.	68°,7	63°,5
— 141° C.	294°	29°,5
— 194°,5 C.	423°	17°,6

Es ist sehr schwer, diese Vergleichung ruhig anzustellen. Einerseits ließ die Theorie eine beständige Vermehrung in der abkühlenden Wirkung der Entspannung erwarten, andrerseits konstatiert man, daß diese Wirkung gerade im Gegenteil sich allmählich mit dem Wert der absoluten Temperatur der abgekühlten Gase vermindert. Ein einigermaßen erträgliches Zusammenfallen findet nur bei den Temperaturen in der Nähe von 0° C. statt. Dann werden die Abweichungen größer, und es steht ganz außer Frage, eine Parallele weiter zu

führen zwischen den Werten, die 10—20 mal größer sind und sich im umgekehrten Sinne als die gegebenen Angaben verändern.

Um die Reihe der Erscheinungen, die im Innern einer Linde-Maschine vor sich gehen, in nützlicher Weise zu diskutieren, ist es passend, sie in der Nähe des kritischen Punktes, also etwa bei —141° ins Auge zu fassen. Wenn die Entspannung schon eine Zeitlang gedauert hat, haben die kalten Gase, die in der zentralen Röhre des Austauschers heruntersteigen, eine dem kritischen Punkte benachbarte Temperatur. Was geschieht dann? Man konstatiert, daß schon vor dem Erreichen der Temperatur von —141° die spezifische Wärme des komprimierten Gases zunimmt. Im Austauscher stellt die Temperaturerniedrigung der eintretenden Gase und die Temperaturerhöhung der fließenden Gase einen Inflexionspunkt dar, wenn man die Temperaturkurven zieht, indem man die Temperaturen als Ordinaten und die zurückgelegten Längen des Austauschers als Abzissen aufträgt. Es wird klar, daß die latenten Wärmen der Verflüssigung sich zu den spezifischen Wärmen der Gasmassen hinzufügen und eine Summe ergeben, die größer ist als die spezifische Wärme bei konstantem Druck. Die Erwärmung der Gase, welche wieder aufsteigen, ist um so viel rascher und die beiden in ent-

gegengesetztem Sinne verlaufenden Erscheinungen kompensieren sich. Von etwa —130° an zeigt sich für ein und denselben gegebenen Punkt des Austauschers eine sehr deutliche Abweichung zwischen der Temperatur der herabfließenden komprimierten Gase und derjenigen der unter einem Druck von einer oder von 20 Atmosphären aufsteigenden Gase. Diese Abweichung wird numerisch um so stärker, je mehr man diesen Punkt dem Entspannungsventil nähert. Es wird alsdann klar, daß eine bestimmte Menge Flüssigkeit vor der Entspannung der Luft gebildet ist und das Ventil in flüssiger Form durchschreitet. Kaum hat diese Menge flüssiger Luft das Ventil durchschritten, als sie teilweise wieder verdampft und die während des letzten Teiles ihres Weges vor der Entspannung abgegebenen latenten Wärmemengen wieder absorbiert. Es vollzieht sich also dort ein Austausch in Form eines geschlossenen Kreises zwischen einer Masse vor der Entspannung gebildeter Flüssigkeit und einer Masse nach der Entspannung verdampfter Flüssigkeit, die in dem Austauscher durch die wieder aufsteigenden Gase mitgerissen wird. Es ist leicht zu beweisen, daß alle Massen von Luft, die in der zentralen Röhre unter hohem Druck vor der Entspannung verflüssigt sind, für die nützliche Herstellung flüssiger Luft ver-

loren sind, d. h. für die Herstellung von flüssiger Luft, die schließlich aus der Maschine herauskommt und gesammelt wird. In der Tat arbeitet der Kompressor unter hohem Druck bis zur schließlichen Entspannung und füllt direkt durch seine Arbeit alle leeren Räume, die sich in der Gasmasse während ihres Weges in der zentralen Röhre bilden. Die Temperaturerniedrigung bewirkt eine Volumverminderung, die Kondensation einer gewissen Gasmasse in flüssige Form wirkt in derselben Weise. Nun nimmt in der Nähe des kritischen Punktes das ganze Volumen kondensierter Luft spontan eine Dichte an, die im Minimum dreimal so groß ist, als diejenige, welche sie hatte, als sie nur erst Gas enthielt. Diese direkt von dem äußeren Kompressor bis auf den Boden des Apparates geleistete Kontraktionsarbeit bringt Wärme hervor, die sich zu den frei gewordenen latenten Wärmen hinzufügt. In der aufsteigenden Phase nehmen diese flüssigen Massen ihr ursprüngliches Volumen wieder an und absorbieren wieder ihre latente Wärme. Beim Herausgehen aus dem Austauscher haben sie wieder die Temperatur der Umgebung, und die eintretenden Massen sind auf 250 Atmosphären, die anderen auf eine oder 20 Atmosphären komprimiert, was wenig ausmacht. Unter diesen Umständen ist die vom Kom-

pressor geleistete äußere Arbeit zur Verflüssigung eines Teiles der Luft vor der Entspannung genau gleich der Arbeit der Dämpfe gegen die im Austauscher herrschende Atmosphäre sowohl während der Verwandlung vom flüssigen in den gasförmigen Zustand als während der Wiedererwärmung. Wenn Herr v. Linde die Wärmebilanz seiner Maschine bei normalem Gange gezogen hätte, so hätte er gewiß diese für die Regulierung des Apparates äußerst wichtige Tatsache gefunden. Also jede Menge von vor der Entspannung verflüssigter Luft ist radikal verloren für die nützliche Produktion der Maschine, und es ist wichtig, sie auf ein Minimum zu reduzieren.

Wir haben den theoretischen Ertrag einer Linde-Maschine berechnet, wobei wir annahmen, daß diese vor der Entspannung verflüssigte Luftmenge ein Minimum sei, um dem System kein Unrecht zu tun. Wir nahmen 800 Liter trockener Luft bei 0° C. an, die auf 250 Atmosphären komprimiert sind. Wir wollen annehmen, daß diese 800 Liter Luft auf 250 Atmosphären komprimiert und vor der Entspannung auf —194,5° abgekühlt seien, ohne sich zu verflüssigen, obwohl diese günstigste Annahme der Wirklichkeit nicht entsprechen kann. Die 800 Liter komprimierte Luft gehen durch das Entspannungsventil, nehmen den schließlichen

äußeren Druck von einer Atmosphäre wieder an und leisten eine äußere Arbeit, deren Maximum wir erhalten, wenn wir das gesamte Volumen bei der Temperatur von —194,5° als gasförmig in Rechnung stellen. Dies ist also ein übertriebenes und praktisch für die Produktion ganz unrealisierbares Maximum.

800 Liter bei 0° und 1 Atmosphäre werden bei 0° und unter einem Druck von 250 Atmosphären ein Volumen V' annehmen,

$$V' = \frac{800}{250} = 3.2 \text{ Liter.}$$

Die vom Kompressor während der Abkühlung dieser Gasmasse von 0° auf —194.5° geleistete Kompressionsarbeit ist durch die Formel gegeben:

$$\left(V^0 - V^0 \frac{t}{273}\right) \cdot 10.33 \times 250 \text{ Kilogrammeter.}$$

Ersetzen wir die Buchstaben durch die entsprechenden Zahlenwerte, so ist

$$\left(3.2 - 3.2 \frac{78.5}{273}\right) 10.33 \times 250 = 5888.1 \text{ Kilogrammeter.}$$

Diese vom Kompressor geleistete Arbeit hat im Innern der Maschine, in der zentralen Schlange, eine Wärmemenge erzeugt, die gleich ist

$$\frac{5888.1}{425} = 13.9 \text{ Kalorien.}$$

Die Luft geht durch das Entspannungsventil und nimmt ein Volumen an, das wir

übertrieben berechnen, um die gegen den atmosphärischen Druck geleistete Arbeit zu steigern. Nennen wir V'' das Maximalvolumen des Gases unter dem Druck von einer Atmosphäre und bei —194,5°, so hat man die Beziehung:

$$V'' = 250\ V' = 250\ V^{\circ} \times \frac{t}{273}$$

$$V'' = 250 \times 3.2 \times \frac{78.5}{273} = 230 \text{ Liter.}$$

Wir können die äußere während der Entspannung geleiste Maximalarbeit berechnen:
Arbeit der Entspannung: = (230l — 0.92l) 10.33 K. was in Kilogrammetern ergibt:

Entspannungsarbeit = 2366.4 Kilogrammeter.

Diese Arbeit absorbiert an Wärme:

$$\frac{2366.4}{425} = 5.57 \text{ Kalorien.}$$

Die entspannte Luft geht in den Austauscher und erwärmt sich wieder unter konstantem Druck. Wir wollen einen vollkommenen Austauscher annehmen. Die Temperatur nach der Entspannung beträgt —194,5°, und die aufsteigende Luft geht am Gipfel des Austauschers mit 0° heraus. Während dieses Weges hat sie sich gegen den äußeren atmosphärischen Druck ausgedehnt. Die so geleistete Arbeit beträgt:

(800l — 230l) 10.33 = 5888.1 Kilogrammeter.

Vom Eintritt der komprimierten Luft unter 250 Atmosphären bis zu ihrem Austritt bei 0°

und unter Atmosphärendruck sind also durch den Kompressor in den Apparat hineingeführt

13.9 Kalorien.

Die Entspannung hat dagegen absorbiert in Kalorien

5.57 Kalorien.

Die Wiedererwärmung dieser Gasmasse, die in beständiger Kommunikation mit der äußeren Luft geblieben ist, hat eine Arbeit verbraucht, gleich:

5888.1 Kilogrammeter = 13.9 Kalorien.

Die Bilanz der von dem Apparat verlorenen und empfangenen Wärmemengen stellt sich demnach wie folgt:

Gewinn: 13.9 Kalorien.

Verluste:

1. Durch die Entspannung 5.57 Kalorien.
2. Durch die Ausdehnung unter konstantem Druck 13.9 „

Summa der Verluste: 19.47 Kalorien.

Zieht man also die Differenz zwischen den Gewinnen und Verlusten, so bleibt ein schließlicher Verlust von

5.57 Kalorien.

Diese 5,57 für die Erhaltung des Maximums an flüssiger Luft zu verwendenden Kalorien rühren von 800 Litern Luft, die auf 250 Atmosphären komprimiert sind, her. Die notwendige Arbeit beträgt im Minimum

$$800 \times 57 = 45600 \text{ Kilogrammeter.}$$

Da die latente Wärme der flüssigen Luft ungefähr 82 Kalorien beträgt, so kann ein Verlust von 5,57 Kalorien bei —194,5° eine Luftmasse verflüssigen von

$$\frac{5.57}{82} = 68 \text{ Gramm.}$$

Da eine Dampfpferdekraft 270000 Kilogrammeter stündlich liefert, so wird der Maximalertrag einer Linde-Maschine sein:

$$\frac{270\,000}{45\,600} \times 68 = 402.6 \text{ Gramm flüssige Luft.}$$

Wir können also versichern, daß eine vollkommene Linde-Maschine, deren Ertrag ganz übermäßig berechnet ist, im Maximum 400 g flüssige Luft per P.S. Stunde liefern wird. In dieser Maschine wird die Entspannung von 250 auf eine Atmosphäre stattfinden. Die Erfahrung hat überdies gezeigt, das man praktisch niemals einen Ertrag erhält, der 300—350 g per indizierte P.S. Stunde unter diesen Bedingungen übersteigt.

Wenn man, anstatt die Luft von 250 Atmosphären auf eine Atmosphäre sich entspannen zu lassen, sich darauf beschränkt, den Druck von 250 Atmosphären auf 20 Atmosphären zu reduzieren, so ändern sich die vorstehenden Gleichungen ein wenig. Nimmt man alle Faktoren so günstig als möglich, so kann man an-

nehmen, daß der Ertrag im umgekehrten Sinne der Kompressionsarbeit und proportional der bei der Entspannung von 250 Atmosphären auf 20 Atmosphären hervorgebrachten Temperaturerniedrigung sein wird. Die Dampfpferdekraft würde also per Stunde als Ertrag ein Gewicht an flüssiger Luft liefern:

$$400 \times \frac{57}{26.09} \times \frac{63.5}{68.7}$$

Das ist

809.6 Gramm.

Dieser ideale theoretische Ertrag ist niemals erreicht worden. Als ich im Juni 1901 in Paris für eine Vorlesung, die ich in der Gesellschaft der Zivilingenieure abhielt, flüssige Luft brauchte, klopfte ich nacheinander bei der Sorbonne, bei der Normalschule, bei der der Künste und Handwerker, bei der Hochschule bei der polytechnischen Schule an. Überall hatte man eine Linde-Maschine, um flüssige Luft herzustellen. Die seit langem in Gang gesetzte Maschine gab aber keinen Tropfen flüssiger Luft, und doch war nirgends eine Undichtigkeit oder ein sichtbarer Fehler zu bemerken. Endlich gelang es Professor d'Arsonval, mit einer mächtigeren Maschine mir nach mehreren Stunden des Betriebes einen Liter flüssiger Luft für meine Vorlesung zu geben.

Um den Ertrag zu verbessern, die Feuchtig-

keit aus der atmosphärischen Luft weg zu nehmen, war Professor v. Linde gezwungen, eine Kältemaschine mit seinem Apparat zu verbinden. Diese Ammoniakmaschine trocknet die Luft und kühlt sie auf eine Temperatur von —30 bis —40° ab, dagegen vermehrt sie die Ausgaben, die Kosten der Kompression und nimmt der Maschine einen sehr großen Vorteil, nämlich den ihrer äußersten Einfachheit. Das im Jahre 1900 auf dem Marsfelde aufgestellte Modell, welches von Prof. d'Arsonval für sein Laboratorium gekauft wurde, war mit einer Ammoniakmaschine verbunden. Dieser Apparat gibt etwa 400—500 g flüssiger Luft per P.S. Stunde.

Einfluss des Druckes beim Linde-Apparat.

Die hohen zum normalen Gange der Linde-Maschine erforderlichen Drucke haben nur einen Vorteil, nämlich in beträchtlichem Maße den Nutzeffekt des Austauschers zu erhöhen. Die Erscheinungen der Konvektion der Gase sind direkt proportional den Zahlen der Stöße, welche die Wände eines Reservoires von den darin einschlossenen Gasmolekülen empfangen. Nun sind diese Stöße den Drucken proportional. Die Temperaturerniedrigung der komprimierten Gase wird also erleichtert und beschleunigt durch eine Druckvermehrung. Überdies ist

auch die Zeit, die eine Gasmasse braucht, um in einer Linde-Maschine von dem oberen Teile des Austauschers zum Entspannungsventil am unteren Teil des Apparates zu gelangen, ebenfalls dem Drucke proportional. Ein Austauscher ist also um so wirksamer, je höher der Druck ist, unter welchem die Gasmassen stehen, die ihn durchschreiten. Das ist die einzige Wirkung der von diesen Instrumenten erforderten hohen Drucke. Dieser Vorteil der hohen Drucke hat auch eine Grenze. Vergleicht man alle Gase untereinander, so sieht man, daß sie alle ohne Ausnahme für hohe Drucke vom Marriotte-Gay-Lüssacschen Gesetz abweichen, und zwar alle in demselben Sinne: Sie werden weniger kompressibel als es dem Gesetz entspricht. Der Wasserstoff beginnt, die anderen Gase folgen ihm. Wir geben hier die vergleichende Tabelle der hauptsächlichsten komprimierten Gase, so wie sie durch die sehr bemerkenswerten Arbeiten des Professors Amagat in Paris festgestellt ist.

Atmosphärische Luft			Sauerstoff		
Druck in Meter Queck-silber bei 0 Grad	Druck in Atmo-sphären	Pro-dukt P. V.	Druck in Meter Queck-silber bei 0 Grad	Druck in Atmo-sphären	Pro-dukt P. V.
24.07	31.67	26 968	24.07	31.67	26 843
34.90	45.92	26 908	34.90	45.91	26 614
45.24	59.53	26 791	45.28	59.58	26 614
55.50	73.03	26 789	55 50	73.03	26 135
64.00	84.21	26 778	64.07	84.30	26 050
72.16	94.94	26 792	72.15	94.93	25 858
84.22	110.82	26 840	84.19	110.77	25 745
101.47	133.51	27 041	101.46	133 50	25 639
133.89	176.17	27 608	133.88	176.15	25 671
177.60	233 68	28 540	177.68	233.66	25 891
214.54	282.29	29 585	214.52	282.26	26 536
250.18	329.18	30 572	303.03	398.72	28 756
304.04	400.05	32 488			

Wasserstoff			Kohlenoxyd		
Druck in Meter Queck-silber bei 0 Grad	Druck in Atmo-sphären	Pro-dukt P. V.	Druck in Meter Queck-silber bei 0 Grad	Druck in Atmo-sphären	Pro-dukt P. V.
24.09	31.69	27 381	24.06	31.66	27 147
34.92	45.94	27 619	34.91	45.93	27 102
45.25	59.54	27 652	45.25	59.54	27 007
55.51	73.04	27 965	55.52	73.05	27 025
64.09	84.33	28 129	64.08	84.31	27 056
72.19	94.98	28 323	72.17	94.96	27 071
84.24	110.84	28 533	84.21	110.80	27 158
101.50	133.55	?	101.48	133.50	27 420
133.92	176.21	29 804	133.90	176.18	28 092
177.62	233.71	30 755	177.61	233.70	29 217
214.55	282.30	31 625	214.54	282.29	30 467
250.19	329.18	32 426	250.18	329.18	31 722
304.05	400.06	33 887	304.06	400.06	33 915

Grubengas			Äthylen		
Druck in Meter Queck-silber bei 0 Grad	Druck in Atmo-sphären	Pro-dukt P. V.	Druck in Meter Queck-silber bei 0 Grad	Druck in Atmo-sphären	Pro-dukt P. V.
24.07	31.67	26 325	24.00	31.58	21 473
34.90	45.92	25 597	34.81	45.80	18 352
45.23	59.51	24 998	45.13	59.33	12 263
55.48	73.00	24 433	55.37	72.85	9 772
64.06	84.28	24 074	63.96	84.15	9 370
72.11	94.88	23 724	71.84	94.53	9 703
84.15	110.72	23 318	83.96	110.45	10 675
101.42	133.45	22 951	101.28	133.13	12 210
133.85	176.11	22 915	133.77	176.01	15 116
177.56	233.63	23 739	177.52	233.58	18 962
214.51	282.25	25 554	214.48	282.21	22 115
250.16	329.16	26 742	250.15	329.15	25 065
304.03	400.04	29 289	303.02	400.03	29 333

Man erkennt hieraus, daß, sobald die Gase vom Mariotte-Gay-Lüssacschen Gesetze in dem Sinne abweichen, daß sie weniger kompressibel werden, sie während ihrer Kompression ein negatives Potential ansammeln. Die Moleküle verschieben wahrscheinlich intermolekulare Äthermassen und wirken ähnlich wie Kautschukbälle. Im Moment der Entspannung geben sie dieses Potential ab, und man sieht freie Wärme trotz der Entspannung der Gase erscheinen. Diese freie am Entspannungsventil entbundene Wärme gestattet deutlich zu kon-

statieren, daß eine Linde-Maschine, die mit reinem auf 150 Atmosphären komprimiertem Wasserstoff arbeitet, der sich von diesem höheren Druck auf atmosphärischen Druck entspannt, genügend Wärme entbindet, um die Temperatur nach der Entspannung um ungefähr 8° C. zu steigern. Nicht nur die äußere gegen den atmosphärischen Druck gelieferte Arbeit wird überdeckt, sondern man konstatiert sogar eine geringe Temperaturerhöhung. Ich habe diesen überaus interressanten Versuch mit Professor Olszewski in Krakau angestellt. Dagegen gelangt man dazu, den Wasserstoff abzukühlen, unter denselben Druckbedingungen bei —90°: dann zeigt sich das umgekehrte Phänomen: der Wasserstoff folgt bei dieser tiefen Temperatur dem Marriotte-Gay-Lüssacschen Gesetz, und bei seiner Entspannung auf atmosphärischen Druck entsteht genau eine Temperaturerniedrigung ähnlich derjenigen, wie sie die atmosphärische Luft liefert. Setzt man die Operation fort, so verflüssigt sich der Wasserstoff seinerseits und tritt wieder in das gemeinsame Gesetz mit allen Gasen ein. Für die atmosphärische Luft muß man den Druck auf 400—500 Atmosphären steigern, um eine ähnliche Erscheinung zu beobachten, wie sie der Wasserstoff darbietet. Ebenso würde es genügen, die Temperatur zu steigern und

die Entspannung bei 100° oder 150° über 0° hervor zu rufen.

Aus allen diesen zahlreichen und genauen Beobachtungen geht hervor, daß für die auf 200—250 Atmosphären komprimierte Luft bei gewöhnlichen Temperaturen von 15—20° C. die innere Arbeit, die man im Augenblick der Entspannung konstatieren kann, vielmehr von entgegengesetztem Zeichen ist, als es die Herren Prof. Schröter und v. Linde in ihren ursprünglichen Abhandlungen angaben. Das Potential würde also dahin wirken, die Wirkung der Entspannung gegen den äußeren Druck zu vermindern, und keineswegs dahin, sie zu vermehren. Geht man von 150 Atmosphären, und für die atmosphärische Luft darüber aus, so wirkt sie wie der Wasserstoff, im Moment der Entspannung wie ein leichter Explosivstoff bei endothermischer Reaktion. Diese Tendenz tritt bei einer Erhöhung der Temperatur und des Druckes stärker hervor.

Folgerungen.

Angesichts einer solchen Diskrepanz bezüglich aller wissenschaftlichen Punkte, die der theoretischen Arbeit des Herrn v. Linde als Grundlage gedient haben, zwischen den logischen und unmittelbaren Schlußfolgerungen, die sich aus der Theorie ergaben, und den Er-

fahrungen, den numerischen Daten und den Erträgen der von diesem in Deutschland hochgeachteten Manne dargebotenen Maschine, steht man ganz erstaunt und kann wohl nur schwer eine Erklärung für eine derartige Anomalie geben. Wir glauben, daß diese Tatsache absolut einzig in der Geschichte der Entwicklung der Anwendungen der Wissenschaft auf die Industrie dasteht. Wir können sie nur mit der Lehre der Physiker im Mittelalter vor der Entdeckung Toricellis und Pascals vergleichen: Sie ließen eine Pumpe arbeiten, die Wasser aus einem Brunnen ansaugte, weil, wie sie sagten, die Natur einen horror vacui habe!

Die innere Arbeit der komprimierten Luft hat gelebt, die äußere Arbeit der Entspannung der komprimierten Luft gegen den atmosphärischen Druck ist die einzige wahre Ursache der Abkühlung, welche die Verflüssigung der Luft in der Linde-Maschine bewirkt.

Anwendung der Linde-Maschine zur Bereitung von Sauerstoff.

Als Anhang zu seinem Patent von 1895 lesen wir in den Ansprüchen des Herrn v. Linde: „Die Möglichkeit, Sauerstoff in verschiedenen Graden der Reinheit sowohl gasförmig als flüssig zu erhalten.“ Die durch seine Maschine erhaltene flüssige Luft wird in ein Reservoir geleitet, in

welchem sich eine Schlange befindet. Man trocknet bei hohem Druck die Leitung, welche die Luft zur Entspannung führt, und zieht aus ihr Luft ab, die in die Schlange geführt wird, welche mindestens teilweise in die flüssige Luft eintaucht. Die Luft unter diesem hohen Druck kühlt sich beträchtlich ab, verflüssigt sich ebenfalls teilweise und kehrt dann in die Hauptleitung vor der Entspannung zurück. Wie verhält sich vor der Entspannung dieses Gemisch abgekühlter flüssiger und gasförmiger Luft unter einem Druck von 200—250 Atmosphären? Wie vollzieht dieses Gemisch seine Entspannung? Alle diese Fragen werden nicht beantwortet! Man kann sich unmöglich irgend eine Idee über das normale Arbeiten so widersprechender Elemente bilden.

Wenn die komprimierte Luft sich abgekühlt hat und vollständig in der Schlange verflüssigt ist, die von der zuvor fabrizierten flüssigen Luft umgeben wird, wenn diese Luft in Kontakt mit dem im Zentrum des Austauschers herabsteigenden Gasstrom unter einem Druck von 200—250 Atmosphären kommt, so muß diese Luft sich fast augenblicklich verflüssigen und ihre Temperatur wieder steigern und das Ventil vollkommen vergast durchschreiten. In diesem Falle wird die Wiedergewinnung der verflüssigten Luft aufgegeben.

Wenn dagegen diese Menge Luft ausreicht, um nicht vollständig zu verdampfen, so ist der Druck von 200—250 Atmosphären nicht mehr möglich, da ja die Maximalspannung der Luft beim kritischen Punkt 51—53 Atmosphären beträgt. Überdies ist es dann Flüssigkeit, welche das Entspannungsventil durchschreitet.

Aus dem, was wir vorher gesagt haben, ist ersichtlich, daß jedes Quantum von vor der Entspannung verflüssigter Luft für die Herstellung nutzbarer Kälte verloren ist. Die Operation hört in diesem Falle beinahe von selbst auf, und da die Fabrikation flüssiger Luft unterdrückt wird, so gibt die Verwendung eines Teiles flüssiger Luft in einem an Sauerstoff mehr oder minder reichen Gasstrom nur ein diskontinuierliches Funktionieren mit einer nicht regulierbaren Qualität des Sauerstoffes. Man sieht in den Ansprüchen dieses Patents deutlich, daß die Absicht, flüssige Luft zu destillieren, formuliert ist. Die Apparate, die Handgriffe, die Anordnung der Ventile, der Leitungen, der Austauscher, der allgemeine Gang, alles dies bleibt in einem Halbdunkel, und es ist nicht einzusehen und völlig unmöglich, irgend ein klares und bestimmtes Resultat in Bezug auf die Bereitung von Sauerstoff daraus deutlich abzuleiten. Wie wir weiter sehen werden, ist diese Meinung von dem deutschen Patentamt, das die Ent-

scheidungen der amerikanischen Richter bestätigte, geteilt worden.

V. Die Apparate und Verfahren von Hampson, Tripler, Ostergreen und Burger zur Herstellung flüssiger Luft. Flüssige Luft als Motor- und Kühlmittel.

Die Hampson-Maschine.

Fast im gleichen Moment, 1895, als v. Linde seinen sensationellen Eintritt mit seiner Maschine und Theorie in Szene setzte, ja sogar noch einige Monate früher präsentierte Hampson in London seine Maschine. In Wahrheit benutzte Hampson lediglich die Entspannung der atmosphärischen Luft wie Linde, nur arbeitete er anstatt mit einer doppelten Entspannung von 200 auf 20 Atmosphären und einer von 20 auf 1 Atmosphäre mit nur einer einzigen Entspannung von 150—200 Atmosphären auf eine Atmosphäre. Sein Austauscher war anders konstruiert; er bestand aus einem Bündel kleiner sehr dünner Windungen von geringem Durchmesser, die eine lange Schlange bildeten, welche in einem kleinen Gehäuse von zylindrischer Form steckte. Der ganze Apparat hatte ungefähr 25 cm Durchmesser und 50 cm Höhe, einschließlich der gegen die äußere Erwärmung schützenden Hüllen. Ein leicht regulierbares Entspannungsventil ließ die Luft am unteren Teile

der Schlange entweichen. Die entspannte Luft floß nach oben, wobei sie die zahlreichen Windungen der Schlange des Austauschers umspülte. Hampson hat seinen Apparat dargestellt ohne sich auf die bei der Konstruktion befolgte und für das Funktionieren der Maschine maßgebende Theorie zu berufen. Der charakteristische Unterschied zwischen dem Hampsonschen Apparat und der Lindeschen Maschine ist die Schnelligkeit und Regelmäßigkeit ihres Funktionierens. Ich habe mehrere Apparate von Hampson zu meiner Verfügung gehabt. Ich ließ sie gewöhnlich bei 150 Atmosphären arbeiten. Ich verwendete 6—8 PS. für den Kompressor und habe stets ohne Ausnahme in Manchester, in Krakau, in London, in New York, in Paris mit der Maschine nach längstens 10 Minuten regelmäßiger Arbeit flüssige Luft gehabt. Mit der Lindeschen Maschine habe ich, nachdem sie geprüft, kontrolliert und in vollkommenen Zustand gesetzt war, niemals flüssige Luft früher als in 2—3 Stunden bekommen. Oft erhielt man selbst trotz stundenlangen Ganges nicht einen Tropfen. Die Hampsonsche Maschine gab regelmäßig 1—1½ Liter flüssige Luft per Stunde mit 6—8 PS. am Kompressor.

Da die Theorie der Hampson-Maschine genau dieselbe ist, als die der Linde-Maschine, so brauchten wir sie hier nur zu wiederholen. Es

ist unleugbar, daß Hampson den Laboratorien einen sehr großen Dienst erwiesen hat, indem er ihnen die bis zum heutigen Tage einfachste, zugleich die stärkste und sicherste Maschine gab, um sich in wenigen Minuten eine kleine Quantität flüssige Luft zu verschaffen. Es ist sehr zu bedauern, daß diese Maschine viele Jahre in der Öffentlichkeit unbekannt blieb. Man kennt sie auf dem Kontinent erst seit etwa 1902. Zwischen Hampson und v. Linde ist über die Konstruktion und die Ausbreitung dieses ausgezeichneten Modells eine Übereinstimmung zu stande gekommen. Die Hampsonsche Maschine ist meines Wissens niemals in großen Dimensionen ausgeführt und zur Befriedigung industrieller Bedürfnisse angewendet worden.

Maschine von Ostergreen & Burger.

Im Jahre 1898/99 sah ich zum ersten Male eine große Maschine zur Herstellung flüssiger Luft in New York. Professor Chanter von der Universität Columbia und einige andere wissenschaftliche Notablen von New York setzten mich mit einer großen amerikanischen Gesellschaft in Verbindung, deren Gegenstand die Erhaltung von Kraft und die Abkühlung mittels flüssiger Luft war. Diese Gesellschaft hatte eine große Werkstatt errichtet und ihre Prospekte verbreitet, worin sie versicherte, daß

die Automobile durch die wunderbare Kraft der flüssigen Luft getrieben werden würden. Außerdem würde jedermann nur noch flüssige Luft benutzen, um die Nahrungsmittel abzukühlen. Fisch, Fleisch würde beliebig konserviert werden, Nahrungsmittel aller Art würden beim Transport auf weite Entfernungen zu konservieren sein, in der Wohnung würde man kalte Luft im Sommer haben können, ebenso in den Eisenbahnzügen, und all dies würde für das Publikum so leicht zu beschaffen sein, daß die flüssige Luft das Eis ersetzen würde. Es gab nur einen dunklen Punkt in diesem wunderbaren Programm. Die erfindungsreichen Ingenieure Ostergreen und Burger gelangten trotz einer Kraft von 300 PS. nicht dazu, flüssige Luft herzustellen. Man arbeitete ganze Tage lang und nichts floß, nicht ein Tropfen flüssige Luft wurde erhalten. Diese Herren und ihre Kapitalisten baten mich, ihren Apparat in Ordnung zu bringen, damit er eine laufende Fabrikation flüssiger Luft ermögliche. Ich stellte gewisse Bedingungen, um ihren Vorschlag anzunehmen. Man kam überein: 1. Daß ich in allen Vorlesungen, die ich an Universitäten, in gelehrten Gesellschaften etc. halten würde, versichern würde, daß ich an dem Zweck der Gesellschaft durchaus keinen Anteil hätte und ihr Programm als vollständig unrealisierbar in

formellster Weise mißbillige. 2. Als Entgelt für meine Arbeit könnte ich alle Versuche ausführen, die mir in meinem persönlichen Interesse passend erschienen, ohne irgend etwas für den Verbrauch der flüssigen Luft, die ich nötig haben würde, zu bezahlen, noch auch sonst eine kommerzielle Belastnng dafür zu tragen.

Nachdem der Vertrag einmal abgeschlossen war, entwarf ich einen Plan radikaler Umformungen der Apparate. Das System Ostergreen & Burger beruhte wie das v. Linde auf der Entspannung der Luft. Es war im Grunde nur ein ziemlich schamloses Nachmachen des Verfahrens, das wir soeben beschrieben haben. Der Austauscher bestand aus vertikalen spiralförmigen Wänden, die aus dünnen Röhren gebildet waren. Alle übereinander liegenden Röhren berührten sich. Die Röhren von gerader Zahl führten die Luft unter Druck zu, die von ungerader Zahl führten die entspannte Luft wieder zu den Kompressoren. Die letzte Entspannung von 20 Atmosphären auf atmosphärischen Druck geschah in einem Apparat mit Glocke und die nicht verflüssigten Gase gelangten nach außen, indem sie zwischen den vertikalen aus Spiralen gebildeten Scheidewänden zirkulierten. Als ich die Maschine beobachtete, sah ich, daß die wesentlichsten Ursachen ihres Nichtfunktionierens die ver-

schiedenen Niederschläge waren, die sich auf dem Röhrensystem bildeten. Der Wasserdampf verwandelte sich schnell in Eis und nach einem Gange von 3—4 Stunden wurde die freie Zirkulation der Luft in dem ganzen Austauscher schwierig und dann bald ganz unmöglich. Ich ließ eine Hilfskältemaschine aufstellen, die Oberfläche vergrößern, eine Menge von Einzelheiten verbessern, die aufzuzählen hier zu groß wäre. Man befolgte aus Sparsamkeit meine Ratschläge nur zum Teil, indessen konnte man bei der Wiederaufnahme der Arbeit nach einem Stillstand von 3½ Monaten, um diese Umänderungen auszuführen, mit dem Andrehen wieder beginnen. Mit 300 PS. und doppelter Entspannung erhielten wir während 12 Stunden etwa 700—800 Liter flüssige Luft. Wir füllten damit Reservoire, die sehr gut mit Filz geschützt waren, und man kam dazu, Sendungen nach fast allen Universitäten von Nord-Amerika zu machen.

Dies ist die erste große Einrichtung in der Welt, welche fast 1000 Liter flüssiger Luft täglich dem Handel geliefert hat. Da die Theorie dieser Maschine dieselbe ist als die der Lindeschen, so geben diese Verfahrungsweisen überall ziemlich ähnliche Resultate, wenn die Maschinen in gutem Zustand sind. Wir werden also hier nur einige nebensächliche und besondere Einzelheiten bei diesen Installationen schildern.

Die motorische Kraft durch flüssige Luft.

Die flüssige Luft kann durch einfache Erhöhung der Temperatur furchtbare Dampfspannungen erzeugen. Wie kann man diese zur Herstellung motorischer Kraft nutzbar machen? Einzig mit Entspannungsmotoren. Nun können notorisch die besten Motoren mit dreifacher Expansion ohne Kondensation im Maximum nur 40—45 kgm per Liter gasförmiger Luft leisten. Hierzu müssen sie noch vorzüglich konstruiert und mit möglichster Sorgfalt gefettet sein. 1000 Liter flüssige Luft, deren Dichte sehr nahe an eins ist, also 1 kg per Liter, können, einmal entspannt, verdampft, und auf Außentemperatur gebracht, nur 800 cbm Luft geben. Die Maximalarbeit, die man also bei dem gegenwärtigen Zustand der mechanischen Konstruktionen mit diesen 1000 Litern flüssiger Luft, wenn sie den stärksten nutzbaren Druck geben, erhalten kann, würde betragen 800 cbm $\times$ 45000 kgm = 36000000 kgm.

Diese Arbeitsmenge ist sicherlich zu hoch gegriffen. Dividieren wir diese Arbeit durch 270000 kgm, welche eine Dampfpferdekraft stündlich liefert, so erhält man als Maximalarbeit (133 PS. per Stunde). Das ist die nutzbare Arbeit bei den besten Bedingungen in einem Motor der sorgfältigsten Konstruktion.

Um diese 1000 Liter flüssiger Luft zu erhalten,

mußte man eine Maschine von 300 PS. während 15—16 Stunden ohne Aufenthalt laufen lassen. Der Ertrag ist kläglich. Er ist etwa 28 per 1000!

$$\frac{133}{16 \times 300} = 0.028.$$

Man konnte es übrigens vorhersehen und sogar zum voraus berechnen. Ein kalter Körper ist derjenige, dem man seine ganze Energie genommen hat. Die Wärmebewegungen sind bei ihm im Verhältnis der Temperaturerniedrigung verlangsamt. Die flüssige Luft ist ein kalter Körper par excellence. Sie befindet sich auf 78,5° absoluter Temperatur und besitzt nur noch ihre Krystallisationsfähigkeit, wenn man ihr noch mehr Wärme entzieht. Wenn man sie als Quelle motorischer Kraft benutzen will, so ist dies gerade so, als hätte man einen schweren Wagen zu ziehen, und der damit beauftragte Ingenieur beriefe zu dieser Arbeit die Lahmen, die Paralytiker, die von Arbeit ermüdeten und die Brustkranken. Man könnte auf diese Weise den Wagen ziehen, aber um den Preis welcher Schmerzen! Wenn man ein Automobil mit 1000 Litern flüssiger Luft füllt, so könnte man es laufen lassen im Verhältnis von 10 PS. per Stunde während 13 Stunden. Wir setzen dabei außerdem keinen Verlust der flüssigen Luft zufolge der umgebenden Wärme voraus. Der Preis der motorischen Kraft per Stunde würde

6

für dieses Automobil etwa *M* 15.— betragen ohne den Führer.

Die Abkühlung durch flüssige Luft.

Die flüssige Luft besitzt eine latente Verdampfungswärme von 80—82 Kalorien. Sie ist also sehr nahe der latenten Schmelzwärme des Eises, 78,5 Kalorien. Es folgt daraus, daß man bei gleichem Gewicht von einem Kilogramm Eis oder ein Kilogramm flüssiger Luft denselben Effekt erhalten wird. Die im Anfang dieser Studie gegebenen thermodynamischen Formeln gestatten uns, sofort den theoretischen Unterschied in den Kosten dieser beiden nützlichen Körper festzustellen.

Um Eis zu fabrizieren, benutzen wir Maschinentemperaturen, welche etwa betragen:

— 10° in den Schlangen des Refrigerators,
+ 30° „ „ „ „ Kondensators.

Indem man diese Temperaturangaben durch ihren Wert in absolute Temperatur ersetzt, werden wir durch die Formel der aufzuwendenden Minimalarbeit den Ausdruck erhalten:

$$\text{Minimalarbeit} = 80^c \times \frac{(273 + 30) - (273 - 10)}{273 - 10} \times 425,$$

woraus man erhält:

$$\text{Minimalarbeit} = 5168 \text{ kgm.}$$

Eine Dampfpferdekraft gibt 52 kg Eis theoretisch. Wenn man für die flüssige Luft nur

latente Wärme in Rechnung bringt, die ihr bei 78,5° absoluter Temperatur zu entziehen ist, so erhält man:

$$\text{Minimalarbeit} = 82^{c} \times \frac{303 - 78{,}5}{78{,}5} \times 425,$$

$$\text{also Minimalarbeit} = 99671 \text{ kgm.}$$

Eine Dampfpferdekraft kann unter diesen Bedingungen nur 2,7 kg flüssige Luft liefern, also 20 mal weniger an Gewicht als die für die abkühlende Wirkung gleichwertige Eismenge.

Diese Gründe sind durchaus schlüssig. Man begreift sehr wohl, daß vor solchen Argumenten, die mir seit langem geläufig waren, es mir unmöglich war, ernst zu bleiben angesichts eines Programms, das in seinen Grundlagen schon vor jeder Ausführung getroffen war.

Erfahrungen mit industriellem Sauerstoff.

Im Herbst 1899 konnte ich persönlich die Frucht meiner Arbeit ernten, indem ich große Mengen flüssiger Luft zu meiner Verfügung hatte. Ich verwirklichte sofort einige schon lange erwartete Erscheinungen. Die wichtigsten davon sind folgende:

1. Ein Strom von Luft, die auf 2—2½ Atmosphären komprimiert ist und in einer Metallröhre flüssige Luft unter atmosphärischem Druck durchschreitet, kondensiert sich dort mit erstaunlicher Schnelligkeit und wird vollständig

im Innern der in die flüssige Luft eingesenkten Schlange flüssig.

2. Die flüssige Luft verdampft, und eine Menge verflüssigter Luft bildet sich in der Schlange.

3. Die flüssige Luft, welche die Schlange umspült, verliert zuerst ihren Stickstoff, und entsendet dann immer sauerstoffreichere Gase.

4. Die Siedetemperatur der flüssigen Luft steigt damit regelmäßig von —194,5° auf —181°, da ja die schließliche Flüssigkeit nur noch reiner Sauerstoff ist.

5. Wenn man ins Innere der Schlange einen Strom von Luft, die vorher auf etwa —190° durch eine besondere Maschine abgekühlt ist, führt, und wenn man den Hahn öffnet, der das andere Ende der Schlange begrenzt, so daß die im Innern der Schlange verflüssigte Luft in das Reservoir fließt, welches diese Schlange enthält, so regeneriert man vollständig die gesamte flüssige Luft, die verdampft, und bewahrt ein konstantes Niveau flüssiger Luft im Reservoir.

6. Der innere Druck der Luft in der Schlange muß 2,3 Atmosphären im Maximum betragen, um eine vollständige und schnelle Verflüssigung der Luft zu erhalten, die man unter Druck in großen Mengen einführt.

Alle diese experimentellen Feststellungen bildeten die Grundlage meiner Patente, die bei meinem Patentanwalt schon seit meiner Ankunft in Amerika niedergelegt waren. Ich hatte schon seit 1895 und 96 auf der Ausstellung in Genf den Plan für einen Apparat verfaßt, mit welchem die kontinuierliche Destillation und Wiedergewinnung der flüssigen Luft ausgeführt werden sollte. Ich habe diese Ideen bei meiner Ankunft in Amerika niedergelegt, und es bot sich die Gelegenheit ganz von selbst, die theoretischen Grundlagen meines Verfahrens auf breiterer Stufenleiter zu verifizieren. Ich machte über alles dies dem Pariser Bankier, Herrn Gustave Pereire, Mitteilungen, da ich hoffte, auf der Pariser Ausstellung 1900 einen ersten Apparat ausstellen zu können, der industriellen Sauerstoff durch die einfache Destillation der atmosphärischen Luft gab und als erste Stoffe nur Kraft und Luft verbrauchte. Herr Pereire nahm zuerst meine Vorschläge günstig auf und entsandte Marineoffiziere und Ingenieure der transatlantischen Gesellschaft, um meinen Demonstrationen beizuwohnen. Ich hielt in den hauptsächlichsten Universitäten der Vereinigten Staaten eine Menge von Vorlesungen, wobei ich flüssige Luft mit mir führte und gläserne Apparate, die es gestatteten, in Projektionsbildern die Verflüssigung der Luft im Innern

von in flüssige Luft getauchten Schlangen zu verfolgen. Bei diesen Reisen begleitete mich Herr Burger, einer der Erfinder der Gesellschaft, welche die Maschinen zur Erzeugung der flüssigen Luft besaß, als Assistent, um mir bei den Versuchen zu helfen, und bezeigte mir seinen besten Dank. Ohne jedes Mißtrauen ließ ich einen kleinen Apparat konstruieren, um durch Destillation der flüssigen Luft Sauerstoff zu erhalten. Ich erhielt das bindende Anerbieten der Herren Ostergreen & Burger diesen Apparat in ein Gefäß zu stellen, das verbunden werden sollte mit der Luftverflüssigungsmaschine. Als diese Herren mich operieren sahen und meine Vorträge hörten, gaben sie sich bald Rechenschaft von der Hohlheit ihres kommerziellen Programmes, denn treu meinem Versprechen wiederholte ich überall die durchsichtigen Gründe, welche ähnliche Projekte zum Scheitern brachten. Gegen Mai 1900, in dem Augenblick, als mein Apparat funktionieren sollte, als alles bereit war, das Röhrensystem fertig, der Gasmotor verbunden etc., etc., ließ mich eine plötzliche Frontveränderung ein für alle Mal die menschliche Schlechtigkeit erkennen:

Eines schönen Morgens komme ich zur Fabrik und finde dort einen Wächter, der mir offiziell ankündigt, daß die Herren Ostergreen

& Burger fänden, mein Sauerstoffapparat könnte irgend eine Feuersgefahr darbieten, und daß sie mir deshalb den Eintritt zur Fabrik verschlössen!!!! Sie fügten hinzu, daß sie schon Patente niedergelegt hätten, um den Sauerstoff durch die Destillation der flüssigen Luft zu erhalten, und daß ich nur ein Nachahmer wäre (sic!).

Ich hinterließ einem guten Advokaten Vollmachten und schiffte mich sofort nach Paris ein, um alle diese Tatsachen Herrn Pereire mitzuteilen. Dieser letztere, der mich in allen diesen Arbeiten hochherzig unterstützt hatte, fragte Pariser Physiker um Rat. Man gab ihm über mein System beklagenswerte oder doch zum mindesten ungenügende Auskunft darüber, daß er etwa mit meiner Sache, die er seit 9 Monaten in Händen hatte, sich weiter abgeben wollte.

Mein vorzüglicher Freund, der Baron Carlos de Watterville, setzte mich in Beziehungen mit Engländern in Manchester und verband sich in sehr rührender und uninteressierter Weise mit der Entwicklung dieser neuen Verfahren. Aber ich erhielt von meinem Advokaten die Nachricht, daß die famosen Herren Ostergreen & Burger ihre Forderung gegen mich vor Gericht gebracht hatten. Ich schiffte mich im Oktober 1900 wieder nach Amerika ein, und

der Kampf vor den Richtern begann. Es gelang mir ohne Mühe, alle Tatsachen in dieser Angelegenheit zu beweisen, trotz des Eides von Burger, welcher durch ein Manöver sein Patent umzudatieren versuchte. Die Richter gaben mir vollständig recht und garantierten mir die Patente auf das Prinzip und die Patente aut den Apparat, um Sauerstoff durch Destillation von flüssiger Luft unter schwachem Druck und zwar in kontinuierlicher Weise zu erhalten.

Um ihre Angriffe zu verstärken, war es meinen Gegnern gelungen, an dem Kampfe die offiziellen Vertreter der Patente Linde, Hampson, Tripler, Dewar teilnehmen zu lassen. Eine allgemeine Koalition, errichtet mit Schilden aller Art, wurde durch einen Spruch des Gerichtes vernichtet, welcher meine Patente bestätigte und sie offiziell publizierte.

Diese Epopé' bot für die Zukunft der flüssigen Luft einiges Interesse dar, sie setzte meinen Beziehungen mit diesen einzelnen Persönlichkeiten, welche sicher als bankrott erklärt waren, ein Ziel.

In derselben Zeit wie Ostergreen & Burger, sah man auch in New York einen gewissen Tripler seinen Apparat für flüssige Luft anpreisen. Dieser hatte rein einfach Linde kopiert! Es war frappant, alles, die Theorie, der Apparat, die Reklame, nichts fehlte zu einer Nachahmung

ersten Ranges. Jeder Mann konnte in Paris im Jahre 1900 auf den Galerien des Marsfeldes die Apparate von Linde an der einen Seite und die von Tripler ein wenig weiter funktionieren sehen. Wir hätten kein Bedürfnis uns bei dieser Nachahmung länger aufzuhalten, wenn wir nicht in der Reklame Triplers noch einen weiteren Artikel über die innere Arbeit der Gase hinzuzufügen fänden. In dem Apparat von Tripler ließ er diese innere Arbeit in ganz geringem Maße beginnen. Diese Arbeit vermehrte sich von selbst, und er erhielt das unerhörte Resultat, daß die flüssige Luft ganz von selbst produziert wurde!

Die amerikanische Reklame ist oft recht amusant!

Herr v. Linde hat seinen Prozeß gegen Tripler in Amerika gewonnen.

In Amerika sprach man um 1900 auch von dem System des Professors Dewar aus London, sowohl um flüssige Luft herzustellen, als um industriellen Sauerstoff zu erhalten. Es ist uns unmöglich gewesen, irgend eine industrielle Anwendung dieser Verfahren zu finden.

Wir haben kurz alle Arbeiten Revue passieren lassen, die irgend einen Wert oder Interesse bei der Frage der Verfahren und der Apparate für die Fabrikation und die Anwendung

der flüssigen Luft von 1854—99 haben. Wenn man von dieser Zeit weiter schreitet, wird die Frage brennend, denn der industrielle Sauerstoff ist auf die Bühne getreten. Die Fabrikation der flüssigen Luft und ihre Anwendung, um Sauerstoff für alle industriellen Zwecke zu erhalten, wird eine Frage von allergrößter Wichtigkeit. Wir wollen die augenblickliche Lage dieses großen Problems unserer Zeit darlegen.

VI. Die flüssige Luft und der industrielle Sauerstoff von 1900—1905.

Gegen Herbst des Jahres 1900 gründete ein Konsortium von Geschäftsleuten in Manchester das Pictet-Syndikat, das sich damit beschäftigte, alle Anwendungen und Versuche anzustellen, die notwendig sind, um die Aufgabe, Sauerstoff von beliebigem Grade der Reinheit durch einfache Destillation flüssiger Luft zu erhalten, durchzuführen. Das Pictet-Syndikat war Eigentümer der Patente in der ganzen Welt. Der für die Versuche ausgewählte Platz war eine Halle der Fabrik Galloway bei Hartwig zu Manchester. Das Inauftraggeben der Maschinen, die Lieferung der Maschinen, die ersten Versuche, die Modifikation an den ursprünglichen Projekten, die mit allen industriellen Unternehmungen zusammenhängenden Finanzfragen

absorbierten eine geraume Zeit. Wir wollen hier nur die wichtigen technischen Veränderungen anführen, welche den Organismus der anfangs für notwendig gehaltenen mechanischen Mittel vereinfacht haben. In den ursprünglichen Plänen war die Sauerstofffabrik zusammengesetzt aus:

1. Einer motorischen Kraft, von der ein Teil durch eine Transmission geliefert wurde, die von einer mächtigen Dampfmaschine abhing, welche alle Werkzeugmaschinen eines Komplexes von Baulichkeiten der Werkstätte Galloway & Co. trieb. Eine Dampfmaschine von 80 PS. trieb direkt in der Halle selbst die notwendigen Kompressoren.

2. Einen ersten Zyklus, der aus Luftpumpen und einem großen Kompressor bestand, dazu bestimmt alle Apparate und die komprimierte Luft auf eine Temperatur von etwa —80° abzukühlen.

3. Aus einem zweiten Zyklus, der aus einer Luftpumpe und einem Kompressor bestand, dazu bestimmt das Stickstoffoxidul oder das Äthylen zu verflüssigen und die Temperatur des Luftverflüssigers auf etwa —140° abzukühlen.

4. Aus drei Luftkompressoren, welche gestatteten, atmosphärische Luft bis auf 80 Atmosphären zu komprimieren, um sie zur Verflüssigung zu bringen.

5. Aus verschiedenen Apparaten zur Verflüssigung und Destillation der atmosphärischen Luft.

6. Aus Gasometern von 60 cbm Inhalt.

Eine erste Reihe von besonders schwierigen und langwierigen Versuchen angesichts der unaufhörlich vermehrten Anzahl unvorhergesehener Zwischenfälle, wie das Brechen von Transmissionen, das Heißlaufen von Lagern, das Leerlaufen von Scheiben, das Zerbrechen der Kuppelung etc. etc. lies uns eine Vereinfachung in der Zahl der gleichzeitig zur Erhaltung der Verflüssigungsphänomene der Luft in Tätigkeit befindlichen Maschinen verlangen. Wir haben nach einigen Versuchen den zweiten Zyklus vollständig unterdrücken können. Diese Unterdrückung wurde mit Freude begrüßt, denn sie vereinfachte das gesamte Material ganz ausserordentlich und brachte die großen Schwierigkeiten der Zubereitung des Äthylens mit unreinem Alkohol zum Verschwinden.

Im Monat Juni des Jahres 1901 veranstaltete ich auf unserer Installation in Manschester eine Demonstration für die Zivilingenieure Frankreichs. Ich sezte das neue Prinzip der Wiedergewinnung der flüssigen Luft unter schwachem Druck in Destillationsapparaten auseinander, und die Möglichkeit auf diese Weise Stickstoff und Sauerstoff bei verschiedenen Graden der

Reinheit abzuziehen. Wir machten über diese Sitzung Mitteilung in einem Exposé, worin die Reihe der physikalischen Erscheinungen im Innern der Apparate auseinander gesetzt wurde

Citat:

Professor d'Arçonval hatte die Liebenswürdigkeit, mir einen Liter flüssiger Luft mit der Linde-Maschine, die er besitzt, herzustellen. Er stand mir in gleicher Weise bei den folgenden Sitzungen zu experimentellen Vorführungen bei.

Während des Jahres 1902 empfing ich in Manchester den Besuch des Herrn Claude, von dem wir noch zu sprechen haben werden. Herr Claude stellte sich uns mit einem Einführungsschreiben von Professor d'Arçonval vor, der uns bat, seinem Schützling jede mögliche Information zu geben. Erfüllt von Dankbarkeit für die guten Dienste des Herrn d'Arçonval ließen wir Herrn Claude die beste Aufnahme zukommen, und er konnte die gesamte Installation der Sauerstofffabrik bis in alle Einzelheiten in der Zeit, die ihrer Inbetriebsetzung unmittelbar vorherging, besichtigen.

Herr Dr. Dreyfuß, ein Mitglied des Pictet-Syndikats bat uns, mit Vertrauen einen Herrn Helbrönner aufzunehmen, einen Beamten von ihm, einen Chemiker. Er wurde mein Assistent und verfolgte alle Apparate von 1902—1903. Ich

probierte in diesen zahlreichen Versuchen die verschiedenen Apparate, welche wir in allen Ländern patentiert hatten, und trug die experimentellen Daten zusammen, die notwendig waren, um große Fabriken errichten zu können, die alle Bedingungen der Beobachtungsjournale, die für diese neue Industrie erforderlich waren, erfüllten.

Gegen Ende des Jahres 1902 erfuhren wir, daß Herr Claude in Paris eine Gesellschaft organisierte, um Sauerstoff durch die Destillation der atmosphärischen Luft zu bereiten. Mein Assistent Helbrönner verlies uns, nachdem er heimlich, ohne uns zu benachrichtigen, ein Patent zur Vervollkommnung bei der Herstellung von Sauerstoff durch Destillation und Rektifikation der flüssigen Luft genommen hatte. Schließlich war Helbrönner in den Dienst des Herrn Claude in Paris getreten. Wir wissen noch nicht, ob Professor d'Arçonval über alle diese Vorgänge unterrichtet ist.

Das Pictet-Syndikat, das sich kürzlich in Pictet Trustees Limited verwandelt hat, hat seine Rechte einer Gesellschaft zur Ausbeutung der Patente in Deutschland übertragen. Die Berliner Installation ist in Arbeit, und ich habe soeben einen neuen Apparat in Betrieb setzen lassen, der uns bei der Erhaltung flüssiger Luft vollständig Genüge leistet. Mit der Beschreibung

dieses Apparates wollen wir diese Skizze beendigen.

VII. Ein neuer Motor mit adibatischer Entspannung zur Herstellung der flüssigen Luft.

Wie man sich durch die ersten Arbeiten, die wir in dieser allgemeinen Revue analysiert haben, überzeugen konnte, hatten Siemens und Solvay in einem Zwischenraum von 30 Jahren die Idee und den Wunsch, flüssige Luft durch die adiabatische Entspannung der komprimierten Luft zu erhalten. Das hervorragende Prinzip dieser Methode wurde beschränkt durch außerordentliche Schwierigkeiten bei der praktischen Ausführung. Die Motoren funktionierten nicht. Sie wurden sämtlich in ihrem Gange aufgehalten, sobald die Temperatur die Grenze von —110° bis — 130° überschritt. Indem ich fast 4 Jahre hindurch eine grosse Menge von Beobachtungen aller Art über die tiefen Temperaturen und ihre Wirkung auf die verschiedenen Körper erhielt, ist es mir geglückt, ein Programm unerläßlicher Bedingungen für die leitenden Prinzipien der Konstruktion eines neuen Motors zu schaffen, der normaler Weise alle Wünsche des Programms erfüllt.

Der neue Motor muß folgende Bedingungen darstellen:

1. Jede Fettung muß unterdrückt werden.

2. Die Kohlensäure, die sich in der Luft befindet, darf sich niemals im Innern des Motors niederschlagen.

3. Der Kolben muß vollkommen dicht sein.

4. Die Reibung muß sehr gering bleiben.

5. Die Entspannung muß beliebig veränderlich sein.

6. Die beweglichen Teile des Motors, Pleuelstangen, Regulierung der Entspannung etc. müssen sich außerhalb befinden und dürfen nicht an den tiefen Temperaturen teilnehmen.

Wir haben die große Freude gehabt, eine vollkommene Lösung für alle diese Forderungen zu finden. Der Motor funktioniert gegenwärtig bei —194,5° wie ein Dampfmotor, mit derselben Leichtigkeit, derselben Regelmäßigkeit und außerordentlicher Bequemlichkeit. Es ist überflüssig hinzuzufügen, daß mit diesem Motor der erste Teil des Programms für industriellen Sauerstoff endgültig und vollständig gelöst ist.

In folgender Weise haben wir diesen Motor konstruiert:

Um jede Komplikation im Mechanismus zu vermeiden haben wir den Motor als einen einfach wirkenden hergestellt. Der Auspuff ist automatisch; wenn der Kolben am Ende des Hubes ankommt, wird eine Reihe von Öffnungen frei, die in der Wand des Zylinders angebracht sind, die Gase entweichen von selbst, und der

Kolben geht frei zurück. Die Zuführung wird durch ein einfaches Ventil aus Stahl erhalten, das sich nur um 4 mm über seinen Sitz erhebt. Die Zuführung der Luft geschieht durch Regulierung der Lenkstangen der Hebel, welche auf das Ventil wirken. Man kann nach Belieben eine Füllung von $^1/_{15}$, $^1/_{10}$, $^1/_5$ und allen Zwischenstufen ohne Ausnahme herstellen. Der Kolben besteht aus einem Gußblock, der mit drei Gußsegmenten armiert ist, die nicht sehr gespannt aber sehr sorgfältig angepaßt sind.

Die Unterdrückung der störenden Wirkung der Kohlensäure ist durch eine überaus einfache Anordnung in radikaler Weise erhalten. Wir bedienen uns immer derselben Menge Luft, die in einem geschlossenen Zyklus eingeschlossen ist, um die flüssige Luft zu erhalten. Es ist also beständig dieselbe Luft, die sich verflüssigt und wieder verdampft, sie kann also nicht neue Mengen Kohlensäure herbei bringen, da diese sich nicht erneuert.

Für die Schmierung haben wir der Achse des Zylinders in Bezug auf die Horizontale eine gewisse Neigung von etwa 25° gegeben; am oberen Ende des Zylinders befinden sich die Öffnungen, durch welche die Luft entweicht. Da der Druck der in den Zylinder eintretenden Luft 60—70 Atmosphären beträgt, und die Füllung von $^1/_{15}$ bis etwa $^1/_{10}$ variert, so sieht

man, daß die Gase bei einem Druck von 4 bis 5 Atmosphären in die Umhüllung, die den Zylinder einschließt und die Luft zum Austauscher führt, entweichen. Diese Gase reißen den größten Teil der verflüssigten Teilchen mit sich, aber ein starker feuchter Dampf schlägt sich auf allen Wänden des Zylinders nieder und benetzt die äußere Oberfläche des Zylinders. Der Kolben gleitet beim Zurückkehren über die durch die Kapillarität zurückgehaltene Flüssigkeit, die flüssige Luft wird sich teilweise wieder verdampfen und unterhält eine sehr schlüpfrige Schicht flüssiger Luft zwischen dem Kolben und den Wänden des Zylinders. Die Reibung ist also so gering wie bei den besten Dampfmaschinen. Der gesamte mechanische Teil des Motors befindet sich innerhalb der tiefen Temperaturen. Der Zylinder ist fast einen Meter ab von dem Ende der parallelen Stangen. Mit Öl erwärmte Stopfbüchsen schützen die Kolbenstangen vor jedem Niederschlagen von Reif.

Wir wollen jetzt rechnerisch die beträchtliche Verbesserung feststellen, welche die Anwendung des neuen Motors bei der Herstellung der flüssigen Luft darstellt.

Ertragsberechnung des Motors.

Um in korrekter und klarer Weise den Nutzeffekt dieses neuen Motors zu berechnen,

ist es passend, von Anfang an die Gangbedingungen genau zu bestimmen, die als numerische Daten angenommen sind. Wir setzen wohlverstanden einen idealen Motor voraus, der bei seiner Arbeit das Maximum von Ertrag verwirklicht. Die Fehler, die Unvollkommenheiten der Konstruktion, die jedem Menschenwerk anhaften, werden diesen Maximaleffekt vermindern, indessen ist es passend, sofort diesen Maximaleffekt zu bestimmen, um die Untersuchung der Verbesserungen für die Folge zu leiten.

Also folgendes sind die genauen Bedingungen beim Übergehen:

Ein Austauscher mit beträchtlicher Oberfläche ist als vollkommen vorausgesetzt, die Rolle des Gewichts des Apparates kommt bei dem Problem nicht in Frage, denn wir nehmen den Betrieb im Zustande des ohne Variation festgesetzten Ganges an. Ein bestimmtes Volumen komprimierte Luft beim Drucke P geht bei einer höheren Temperatur t' nach dem oberen Ende des Austauschers. Diese Luft geht ins Innere des Austauschers und kühlt sich allmählich bis zu einer bestimmten Temperatur t ab, bei welcher sie unter vollem Druck ins Innere des Motors geht. Wir setzen die Zuführung bei 1/10 des Ganges voraus. Das Ventil schließt sich und der Kolben voll-

endet seinen Gang, während der Druck im Innern des Zylinders von P zu p übergeht. Unter der Wirkung einer vom Kolben nach außen mittels der Stange des Motors geleisteten Arbeit hat sich die Luft abgekühlt und teilweise verflüssigt. Wir setzen die Wirkung der Oberfläche des Zylinders als Null voraus und nehmen an, daß sie die Wärme überhaupt nicht leitet. Die nichtverflüssigte und die verflüssigte Luft gehen am Ende des Ganges aus dem Zylinder und fallen in ein gemeinsames Reservoir, das unter dem Austauscher angebracht ist. Die flüssige Luft wird insgesamt auf den Boden dieses Reservoirs fallen, und nur die nicht verflüssigte Luft steigt in die Windungen des Austauschers. Im selben Augenblick kommt ein Luftstrom unter dem Drucke P, der in der herabsteigenden Leitung getrocknet ist, in die Schlange, die in das Reservoir taucht, das sich mit flüssiger Luft füllt Wir nehmen die Rechnung in dem Augenblicke an, wo dieses Reservoir genügend gefüllt ist um die darin befindliche Schlange vollständig zu bedecken. Man reguliert die Menge komprimierter Luft, welche in diese Schlange kommt, in der Weise, daß sich ebensoviel verflüssigte Luft vergast, als in jedem Augenblick innerhalb des Motors fließt. Die in der Schlange verflüssigte Luft fließt aus dem Apparat und

stellt durch ihr Volumen und ihr Gewicht den gesuchten Ertrag des Motors dar.

Die flüssige Luft, die wieder gasförmige Luft wird, kocht unter Atmosphärendruck und geht aus dem Reservoir bei —194,5°, um sich im unteren Teil des Austauschers mit der nicht verflüssigten Luft zu vereinigen, die aus dem Motor unter demselben Druck und derselben Temperatur von —194,5° kommt. Dank diesen realisierbaren und in der Praxis realisierten Bedingungen wird der Austauscher gleichzeitig von oben nach unten und von unten nach oben von Luftmassen durchschritten, die an Gewicht identisch sind. Die eine dieser Massen tritt ein unter dem Druck P bei der Temperatur t'. Die andere Masse tritt aus bei atmosphärischem Druck. Da der Austauscher vollkommen ist und die Temperatur t' viel höher ist als der kritische Punkt der Luft, —141°, und da der Druck P unterhalb von 100 Atmosphären bleibt, so kann man ohne Fehler versichern, daß die Austrittstemperatur genau gleich sein wird t' derselben als die der Luftmasse, welche in den Austauscher eintritt unter dem Druck P.

Nachdem diese Grundlagen genügend festgestellt sind, wollen wir verfolgen, was in den beiden im umgekehrten Sinne gehenden Luftströmen vor sich geht.

1. Phase. Die auf den Druck P komprimierte Luft kühlt sich allmählich ab von t' bis zu der Temperatur, die in der Nähe des kritischen Punktes liegt. Während dieser ersten Phase haben die inneren und äußeren Luftmassen für jeden im Austauscher durchschrittenen Meter ihre Temperatur im umgekehrten Sinne um ein und dieselbe Anzahl von Graden verändert.

2. Phase. Die auf P komprimierte Luft nähert sich dem kritischen Punkt — 141°. Wenn wir für P einen Druck von 60—70 Atmosphären annehmen, so konstatieren wir, sobald die Temperatur —110° bis —115° ist, daß die Temperatur der herabsteigenden Luft sich nicht mehr ebenso schnell erniedrigt, man überzeugt sich, daß eine Wärmequelle im Innern der Röhre erscheint. Diese Wärme rührt her:

1. Von einer molekularen Kondensation kleiner Gasmassen, die im freien Zustand ihre Kondensationswärme verlieren.

2. Von der vom Kompressor gelieferten Arbeit, welcher direkt den durch diese molekulare Kondensation geschaffenen freien Raum ausfüllt.

Parallel konstatiert man an dieser Stelle, daß im Austauscher die aufsteigenden Luft-

massen sich für jeden durchschrittenen Meter schneller erwärmen.

3. Phase. Vom kritischen Punkte an bis zum Austrittsventil zieht sich die dritte Phase hin. Sie ist charakterisiert durch eine vollständige Scheidung der Temperatur zwischen den herabsteigenden und aufsteigenden Luftmassen.

Diese Diskussion der dritten Phase gehört zu den lehrreichsten und wichtigsten Teilen in dem Problem, das uns beschäftigt. Ohne in jeder Lage den entsprechenden genauen Zustand der aufsteigenden und absteigenden Luftmassen zu geben, können wir doch ihre äußersten Grenzen und ihre Summen genau bestimmen.

Die Arbeit des Kompressors wird als Quantum von in Wärme verwandelter Arbeit das Gesamtvolumen der vor dem Entspannungsventil verflüssigten Luftmassen geben. Diese so gebildete flüssige Luft wird in den Motor-Zylinder eintreten und sich mit der nicht verflüssigten Luft entspannen. Aber die Kältequelle, welche diese vom Entspannungsventil bis zu dem Punkt des Austauschers, an welchem die zweite Phase beginnt, gelieferte Wärmemenge absorbieren wird, besteht nur in einem Gasstrom einer an Gewicht gleichen Luftmenge, welche bei —194,5° hereinkommt,

um sich bei Beginn der zweiten Phase auf etwa —110° zu erwärmen. Hierbei kann die Luft sich nur unter konstantem Druck wieder erwärmen und gegen den atmosphärischen Druck eine äußere Arbeit leisten, die gleich sein wird der des Kompressors während der allmählichen Abkühlung der herabsteigenden Luftmengen.

Die Kältequelle ist also begrenzt.

Man erkennt sofort, daß das notwendige dynamische Gleichgewicht beim Gange durchaus die herabsteigende Luft hindern wird, kälter zu werden.

Die auf den Druck P komprimierte Luft wird in den Motorzylinder bei einer dem kritischen Punkt sehr nahe benachbarten Temperatur eindringen müssen. Die latenten Wärmen der Luft wirken so auf die spezifische Wärme, daß jede Temperaturerniedrigung unterhalb des kritischen Punktes durch unmittelbare Kondensation Wärmemengen liefert, welche die aufsteigende Luftmasse unfähig ist aufzunehmen. Also hält die Kondensation an, und die Temperatur der Luft unter Druck kann nicht sinken. Die ganze Kraft des Austauschers scheint sich dann auf eine Stelle zu übertragen, die viel aktiver ist als die andern, nämlich die, wo die inneren Verflüssigungen beginnen. Diese Stelle beginnt mit ihrem Maximum von Intensität un-

mittelbar über dem Entspannungsventil, denn dort befindet sich die Kältequelle mit ihrem Intensitätsmaximum. In der Tat, wenn wir für 800 Liter Luft, also für 1 kg Luft, den gesamten Abkühlungswert der aufsteigenden Luftmasse berechnen, so hat man

$1 \text{ kg} \times 0{,}23751 \; (-194{,}5^{\circ} - 110^{\circ}) = 20.07$ Kalorien.

Also jedes kg gasförmige Luft, das am unteren Ende des Austauschers eintritt, kann in der dritten und zweiten weiter oben analysierten Phase ein Maximum von 20.07 Kalorien absorbieren.

Welches ist das Gewicht der in der gasförmigen Masse unter dem Drucke P gebildeten flüssigen Luft?

Diese Frage kann heute nicht vollständig gelöst werden, aber man kann auf experimentellem Wege angenäherte Lösungen für sie finden.

Indem man sehr genaue Wasserstoffthermometer in die Luftleitung setzt, gerade oberhalb der Entspannung vor dem Ventil, kennt man mindestens die Temperatur des aus flüssiger und gasförmiger Luft bestehenden Gemisches komprimierter Luft. Es ist klar, daß, je höher der Druck P ist, auch der Anteil flüssiger Luft um so größer sein wird. Diese stärkere Bildung von Flüssigkeit wird zur Folge die Erhöhung

der Temperatur haben. Denn da das Gewicht der gebildeten Flüssigkeit die bestimmte Menge von 20,07 Kalorien für jedes kg Luft darstellt, und andrerseits für ein und dieselbe Temperatur in der Nähe des kritischen Punktes das Gewicht der gebildeten Flüssigkeit sich mit dem Drucke vermehrt, so wird jede Steigerung von P notwendig als Konsequenz mit sich bringen eine absolute Temperatursteigerung für den Austritt der Luft aus dem Austauscher gerade vor dem Entspannungsventil.

Dieser experimentell verifizierte Schluß könnte zunächst glauben machen, daß eine Drucksteigerung dem Ertrage des Motors entgegenwirken würde. Wenn man jedoch das Studium der Erscheinungen, die in dem Zylinder vor sich gehen, weiter verfolgt, so kommt man zu einem entgegengesetzten Schlusse.

Nach zahlreichen Versuchen mit Turbinen ging ich zu Versuchen über, die auf der Anwendung eines ganz neuen Motors beruhten, der die Anwendung der adiabatischen Entspannung trockener komprimierter und abgekühlter Luft gestatten sollte, um große Mengen flüssiger Luft zu erhalten. Diese in Berlin und in Mailand angestellten Versuche haben uns wertvolle Fingerzeige für die allgemeine Theorie der Luftverflüssigungsapparate geliefert.

Beschreibung des Motors.

Zunächst geben wir eine genaue Beschreibung des angewendeten Motors, der in der Tat überaus einfach ist:

Der Bewegungskolben empfängt die trockene komprimierte und abgekühlte Luft zufolge automatischer Öffnung eines Kegelventils. Dieses sehr genau gearbeitete Ventil hat nur einen Spielraum von 4 mm und einen Durchmesser von 23 mm. Der Durchmesser des Zylinders beträgt 106, der Kolbenhub 350 mm. Wenn der Kolben in Bewegung ist, so läßt er Öffnungen frei, die kranzförmig in der dicken Wandung des Zylinders gebohrt sind. Die Luft kann also bis auf atmosphärischen Druck entweichen. Ein Entweichungsventil gestattet der in dem Zylinder verbleibenden Luft, am Boden des Zylinders herauszugehen. Dieses Ventil wird durch einen auf der Welle des Motors angebrachten Exzenter betätigt. Um den Zylinder empfängt eine zylindrische Hülle aus Kupfer die Gase bei ihrem Entweichen, sowie die während des Betriebes verflüssigte Luft.

Die verflüssigte und die nichtverflüssigte Luft gehen durch eine dicke Kupferröhre von 100 mm Durchmesser in ein Reservoir, das am unteren Ende eines röhrenförmigen kupfernen Austauschers angebracht ist. Dieser Austauscher steht vertikal und ist in einem kurzen

Abstande vom Motor angebracht. Der Austauscher besteht aus einem System kupferner paralleler Röhren von kleinem Durchmesser.

Die trockene komprimierte, durch eine mächtige Kältemaschine abgekühlte Luft kommt am oberen Ende des Austauschers an. Ein Wasserstoffthermometer gibt genau die Temperatur der Luft beim Eintritt in den Austauscher an. Ein anderes Wasserstoffthermometer gibt die Temperatur dieser komprimierten Luft am unteren Ende des Austauschers vor ihrem Eintritt in den Motor mit adiabatischer Entspannung an. Ein drittes Wasserstoffthermometer gibt die Temperatur der Luft nach ihrem Austritt aus dem Motor in der Doppelhülle an, welche sie aufnimmt und ins Reservoir führt. Ein viertes Wasserstoffthermometer endlich gibt die Temperatur der nicht verflüssigten Luft beim Austritt aus dem Austauscher an, welche in Windungen von unten nach oben wieder aufsteigt und ihre Temperatur mit derjenigen der komprimierten Gase, welche in den Windungen von oben nach unten gehen, austauscht.

Charakteristisch für unsern Motor sind noch folgende Anordnungen.

Der ganze Motor besteht aus 2 Teilen:

Der erste Teil besteht aus dem Stellkreuz, dem Wellbaum, den Scheiben, und einem Gestell, welches alle Teile des Motors verbindet.

Dieser äußere, sichtbare Teil befindet sich auf der Temperatur des Laboratoriums.

Vier starke Stahlstangen von fast 800 mm Länge verbinden diesen äußeren Teil mit dem Zylinder, in welchem der Bewegungskolben arbeitet. Die Kolbenstange ist von einer langen metallischen Hülle umgeben, die mit einer Stopfbüchse endigt, welche durch die Flamme eines Gasbrenners oder einer Spirituslampe auf passender Temperatur gehalten wird. Die Stopfbüchse befindet sich in einem heißen Ölbad, und dieses Ölbad eben wird durch die Gas- oder Spiritusflamme geheizt.

Der Zylinder ist ebenso wie sein Gestell schräg zur Horizontalen angeordnet. Er liegt etwa 60 cm tiefer als die Achse des Motors. Die Erfahrung hat gezeigt, daß diese schräge Lage ausgezeichnet ist, um eine Verbindung der tiefen Temperaturen mit den Verbindungsstangen und der Stopfbüchse zu verhindern.

Die Entspannung wird durch ein Eintrittsventil reguliert, dessen Öffnung durch 2 Bolzen veranlaßt wird, welche die Länge, auf die hin das Gas ohne Druck eingelassen wird, bestimmen. Diese Regulierung kann während des Betriebes geschehen. Eine Zentrifugalpumpe wird von einem starken Riemen, der über das Stellkreuz läuft, angetrieben. Durch den Gang der Pumpe erhält man einen beträchtlichen

Wasserstrom, wobei das Wasser im unteren Raume des Reservoires angesaugt wird und dann im vollen Strahl nach dem oberen Teile strömt. Diesem Strom kann man durch ein Ventil einen beliebigen Druck zwischen 0 und 2 Atm. geben.

Bei normalem Gange haben wir einen Luftkompressor, der genau 800 cbm stündlich bei einem Druck von 4½ Atm. ergibt. Ein Compoundkompressor saugt diese Luft unter diesem Druck von 4½ Atm. an und bringt sie auf 21 oder 22 Atm. Der 2. Zylinder des Compoundkompressors saugt die auf 22 Atm. komprimierte Luft an und bringt sie auf 55—60 Atm. Enddruck, der für alle unsere Anwendungen ausreicht. Nach jeder Kompression wird die durch die Kompressionsarbeit erwärmte Luft in einer langen Schlange, die in Brunnenwasser taucht, gekühlt.

Zufolge dieser Anordnung kommt die Luft mit + 15° in jeden Zylinder zurück, wo sie eine neue Kompression erfährt. Die auf 55—60 Atm. komprimierte und dann auf + 15° in der Schlange, welche in die mit strömendem Wasser angefüllte Wanne taucht, abgekühlte Luft dringt in einen Trockner von besonderer Konstruktion ein. Derselbe trocknet die komprimierte Luft vollständig, erniedrigt ihre Temperatur auf etwa —65 bis —75° und filtriert sie beim Austritt sehr

stark, bevor er sie den vor dem adiabatischen Motor befindlichen Austauscher erreichen läßt.

Die Gase verflüssigen sich in dem Motor teilweise, und der nicht verflüssigte Teil steigt in dem Austauscher auf, um zu den Kompressoren zu gelangen. Wir haben die störende Wirkung der Kohlensäure vollkommen beseitigt, indem wir den neuen Luftmotor nur mit schon verflüssigten Gasen speisen, die bereits jede Spur von Kohlensäure verloren haben.

Im Gegensatz zu den schlechten Erfahrungen mit den Apparaten von Professor v. Linde, Dewar, Solvay usw. arbeitet dieser Motor mit absoluter Regelmäßigkeit und liefert in unserer Sauerstofffabrik große Mengen flüssiger Luft.

Nach dieser Einleitung wollen wir zur Analyse der durch die Erfahrung gegebenen Daten übergehen.

Numerische Beobachtungen.

Bei der außerordentlichen Regelmäßigkeit, mit welcher unser Motor arbeitet, haben wir den Gang während mehrerer Stunden hintereinander festgestellt. Die Ausdehnung des Ganges bis auf 10 und 15 Stunden sichert für die Beobachtungen der Thermometer, der Manometer, der Produktion an flüssiger Luft usw. eine fast absolute Exaktheit.

Wir haben zwei Betriebsformen gehabt; die erste wurde erhalten, indem man 2 Luftkom-

pressoren gleichzeitig arbeiten ließ, wovon der eine 250, der andere 100 cbm Luft, zusammen also 350 cbm komprimierten und zwar durch den Compoundkompressor auf 55—60 Atm.

Bei der zweiten Form arbeitete nur der große Kompressor von 500 cbm Luft stündlich, die in dem Compoundkompressor komprimiert wurden.

Folgendes sind zunächst zahlenmäßig die Dimensionen des Motors, der so reguliert war, daß die gesamte auf hohen Druck komprimierte Luft ohne Druckänderungen durch den großen offenen Motor zur Anwendung kam.

Die Rotationsgeschwindigkeit des Motors war durch das Ventil regulierbar, welches auf den Wasserstrom der Zentrifugalpumpe wirkte

Ich nehme zwei Beobachtungen, die mit den beiden Betriebsformen gemacht wurden, als Grundlage für die Rechnungen.

Durchmesser des Motors	=	106 mm
Gang des Kolbens	=	350 mm
Schädlicher Raum	=	2 mm
Zugang bei vollem Druck	=	35 mm.

Normaler Gang bei der ersten Form mit 350 cbm stündlich.

Beispiel vom 2. September 1906.

Produktion an flüssiger Luft 27,9 kg Flüssigkeit stündlich.

Tourenzahl des Motors 138 Touren.

Druck im Motor 53 Atm.

Normaler Gang bei der zweiten Form mit dem Kompressor von 500 cbm stündlich.

Hier geben wir alle numerischen Daten, denn dieses ist in Wahrheit der normale Gang des Apparates:

Beispiel vom Sonnabend, den 8. Septbr. 1906.

Barometerhöhe	761 mm
Temperatur vor dem Austauscher	185 mm = —63,5°
Temperatur der Luft vor dem Motor	350 mm = —131,0°
Temperatur der Gase oben im Austauscher	202 mm = —67,9°
Druck der Luft im Motor	52 Atm.
Tourenzahl des Motors	160 in der Minute
Effektive im Reservoir gesammelte und gemessene flüssige Luft	52,7 kg
Temperatur der vom Kompressor angesaugten Luft, die aus dem Austauscher zurückkommt	—2°

1. Gewicht der stündlich komprimierten Luft.

Das Volumen mit der Dichte multipliziert gibt, wenn man der Temperatur Rechnung trägt:

$$500 \times 1{,}293^{\text{Kgr.}} \times \frac{273}{271} = 651{,}271 \text{ Kgr. stündlich.}$$

2. Volum der Luft unter dem Druck von

22 Atm., die bei jeder Tour des Motors absorbiert wird.

Oberfläche des Kolbens $\left(\frac{106}{2}\right)^2 \times 3,14 = 88,243$ qcm

Schädlicher Raum	$0,2 \times 88,243 =$	17,6486 cbcm
Zugang	$3,5 \times 88,243 =$	308,96 „
Volum per Hub	$=$	326,6 „
Volum per Stunde	$326,6 \times 160 \times 60 =$	3135,4 Liter

Der Motor empfängt 3135,4 Liter komprimierter Luft stündlich.

3. Mittlere Dichte der komprimierten und abgekühlten Luft im Motor.

Das Thermometer zeigt uns vor dem Eintritt in den Motor -131^0 C.

In der Luft beim Eintritt in den Motor zeigt es eine absolute Temperatur von 142⁰.

Das stündlich in den Motor eingeführte Luftquantum ist 651,271 kg.

Das Volumen, unter welchem diese Luft eindringt, ist 3135,4 Liter stündlich.

Also beträgt die mittlere Dichte der Luft im Motor während des Zuganges:

$$\frac{651,271}{3135,4} = 0,20777.$$

4. Mittlere Dichte der auf 52 Atm. komprimierten Luft bei 142^0 absoluter Temperatur.

Die Dichte der nicht verflüssigten auf 52 Atm. komprimierten und auf 142^0 absoluter Temperatur abgekühlten Luft wird durch den Ausdruck gegeben:

$$\frac{1{,}293 \times 52 \times 273}{142} = 129{,}2 \text{ g}.$$

5. Schlußfolgerung.

Die Luft, welche in den Motor eindringt, hat eine Dichte von 207,8 g im Liter; die nichtverflüssigte Luft unter denselben Druck- und Temperaturverhältnissen würde nur 129,2 g wiegen.

Also ist hier flüssige Luft gemischt mit gasförmiger Luft.

Dieses Gemisch von der Dichte 207,8 g gestattet, zwischen dem verflüssigten und dem gasförmig gebliebenen Teil deutlich zu unterscheiden.

Methode der Berechnung des Gewichtes der verflüssigten Luft.

Wir kennen durch direkte Versuche und durch Extrapolation den Dilatationskoeffizienten der flüssigen Luft zwischen —194,5° und —172°. Wir haben einen dem Koeffizienten des flüssigen Azetylens ziemlich nahen Wert gefunden:

$$\alpha = 0{,}00842205.$$

Ein Liter flüssiger Luft, deren Temperatur von —194,5° zu —131° übergeht, wird nicht mehr ein Kilogramm wiegen, sondern eine Dichte haben, die durch den Ausdruck gegeben ist:

$$\overset{k}{1} \times \frac{1}{1 + \alpha\,[(194{,}5) - (-131)]} = 0\overset{k}{,}4652.$$

Der Liter flüssiger Luft wird also nur noch 465,2 g wiegen. Mit zwei Gleichungen und zwei Unbekannten wollen wir nun das Gewicht der verflüssigten Luft, die mit nichtverflüssigter Luft gemengt ist, bestimmen.

Wir nennen x das Volumen der gasförmigen Luft in cbcm, die bei jedem Hub in den Motor eintritt. Wir nennen y das Volumen verflüssigter Luft, welches mit x cbcm gasförmiger Luft in den Motor eindringt. Dann haben wir die folgenden Gleichungen:

$$x \times \overset{g}{129{,}2} + y \times \overset{g}{465{,}2} = \text{mittleres Gewicht bei einer Umdrehung.}$$

$$x \times 129{,}2 + y \times 465{,}2 = \overset{g}{207{,}77} \times \overset{c^3}{326{,}55}.$$

Die zweite Gleichung ist durch die Bedingung gegeben:

$$x + y = 326{,}55$$

Die numerische Lösung dieser beiden Gleichungen gibt:

$$x = 250{,}19 \text{ cbcm}$$
$$y = 76{,}36 \text{ cbcm}$$

Wir haben also 76,36 cbcm verflüssigter Luft mit der nicht verflüssigten Luft gemischt.

Berechnung der latenten Wärme der verflüssigten mit nichtverflüssigter Luft gemischten Luft.

Wir wissen durch eine Reihe von Tatsachen, daß die spezifischen Wärmen der Körper

stets mit der Temperatur zunehmen. Diese Regel hat keine Ausnahme. Wenn wir nun den normalen Betrieb unseres Apparates betrachten, so konstatieren wir:

1. Am oberen Ende des Austauschers treten die komprimierten Gase mit einer Temperatur von —63,5° ein.

2. Beim Herauskommen haben die Gase eine Temperatur von —67,9°.

Beim Herauskommen sind die Gase also um 4,4° kälter, woraus hervorgeht, wie gut die Flächen ausgenutzt sind.

Die Menge des in dem Austauscher aufsteigenden Luftstroms ist gleich der Menge komprimierter Luft, die im umgekehrten Sinne zum Motor strömt, vermindert um die Luftmenge, die in flüssiger Form am unteren Ende des Austauschers bleibt. Die Differenz dieser beiden Mengen ist uns bekannt.

Menge der eintretenden komprimierten Luft: 651,271 kg.

Menge der aufsteigenden Luft unter 1 Atm. Druck nach der partiellen Verflüssigung: 651,271 — 52,7 = 598,57 kg.

Wir wollen jetzt die Bilanz der Wärme ziehen, welche uns die absteigende Luft geliefert hat, mit derjenigen der im Austauscher aufsteigenden Luft.

Unter konstantem Druck von 52 Atm. gelieferte Wärme.

Absteigend haben wir 651,271 kg Luft, die mit einer Temperatur von — 63,5° eintreten und sich bis auf — 131° unten im Austauscher abkühlen. Nehmen wir für die spezifische Wärme der Luft unter konstantem Druck den von Regnault gelieferten Wert, so haben wir

gelieferte Wärme = 651,271 × 0,23751 × (131—63,5) = 10203,2 Kal.

Die Wärme wird von dem Gasstrom geliefert, wenn keine Verflüssigung stattfindet.

Von dem unter konstantem, dem Atmosphärendruck gleichen Druck aufsteigenden Luftstrom absorbierte Wärme.

Gewicht der aufsteigenden Luft:	589,571 kg
Anfangstemperatur:	— 194,5°
Endtemperatur:	— 67,9°.

Während der Erwärmung dieser Luft bei ihrem Durchgang durch den Austauscher absorbierte Wärme:

598,571 × 0,23751 × (194,5 — 67,9) = 18040 Kal.

Wir finden also experimentell, daß der aufsteigenden Luftmasse 18040 Kal. geliefert sind, während nach der Rechnung die niedersteigende Luftmenge nur 10203,2 Kal. hat liefern können.

Als Erklärung für diese Erscheinung bieten sich zwei Lösungen dar:

Entweder steigt die spezifische Wärme der Luft plötzlich in der Nähe des kritischen Punktes zwischen —110° und —140°, oder ein Teil der Luft verflüssigt sich und gibt seine latente Verflüssigungswärme ab, die zu der spezifischen Wärme hinzukommt. Die zweite Hypothese stimmt mit einer solchen Menge von Tatsachen und stützenden Überlegungen überein, daß wir sie unbedenklich annehmen. Die Dichtigkeitsvermehrung der Luft und die Vermehrung der von der absteigenden Luft gelieferten Wärme sind der Temperaturerniedrigung nicht proportional; wir werden in einer späteren Studie beweisen, daß die Dichte und die gelieferte Wärme wachsen, wie Zahlen, von denen die Temperatur die Exponentialgröße ist.

Die Konstante wird nur angewendet auf denjenigen Teil der Luft, welcher gasförmig bleibt und der dieselbe spezifische Wärme behält. Die Vermehrung der Wärme rührt nur von dem Teile der Luft her, der unterhalb des kritischen Druckes und oberhalb der kritischen Temperatur flüssig wird. Dieser Punkt ist in der Physik von der höchsten Wichtigkeit; er ist durch das Vorhergehende absolut sicher gestellt.

Die Spannung der gesättigten Dämpfe oberhalb des kritischen Punktes ist eine Exponentialfunktion der Temperatur; die Größe, die in die

Gleichung eingeht, bezieht sich also auf eine zwischen dem kondensierten Teile und dem der gasförmig geblieben ist.

Alle diese bezüglich ihres experimentellen Beweises und ihrer Theorie neuen Punkte beschränken sich nicht auf die vorliegende Arbeit.

Berechnung der latenten Wärme der bei —131° unter dem Druck von 52 Atm. kondensierten Luft:

Wir kennen das Gewicht der bei jedem Kolbenhube vor der Entspannung verflüssigten Luft. Wir wissen, daß unter den 326,55 cbcm, welche das Volumen der Gase unter Druck bei der Öffnung des Zuführungsventils darstellen, ein Volumen von 76,36 cbcm die in den Zylinder eindringende flüssige Luft darstellt. Die vorhergehende Rechnung gibt uns auch die Dichte dieser flüssigen Luft bei —131°. Ein Liter flüssiger Luft wiegt nur 465,2 g. Wenn man nun das Gewicht des Liters mit dem Volumen der flüssigen in den Motor per Stunde eingeführten Luft in Litern multipliziert, so findet man $465{,}2 \times 76{,}36 \times 160 \times 60 = 341{,}02$ kg.
Das ist das Gewicht der flüssigen Luft, die in jeder Stunde mit der nichtverflüssigten Luft in den Motor eindringt. Während der Bildung dieser flüssigen Luft entbindet sich eine latente Wärme von
18040 Kal., von der aufsteigenden Luft absorbiert.

10203,2 Kal., geliefert von der nichtverflüssigten Luft.

7836,8 Kal., geliefert während der Verflüssigung.

Teilt man also diese Wärmemenge durch das Gewicht der verflüssigten Luft in kg., so erhält man die latente Wärme der Luft bei — 131°, nämlich

$$\frac{7836,8}{341,02} = 22,98 \text{ Kal. per kg.}$$

Diese während des Betriebes unseres Motors gemachten Beobachtungen geben uns Aufklärung über mehrere noch völlig unbekannte physikalische Faktoren.

Kritisches Studium der Diagramme des Motors.

Wir haben direkt am Motor mit Indikatoren noch keine Diagramme nehmen können, aber wir haben ein Diagramm mittels aufeinanderfolgender Punkte mit Hilfe folgender Überlegung gezogen:

Es ist augenscheinlich, daß während des Eintritts der komprimierten und abgekühlten Gase unter vollem Druck in den Zylinder die Arbeit, die durch den Motor erzeugt wird, direkt von dem Kompressor geliefert wird, welcher durch alle Röhren auf den Kolben des Motors wirkt. Die komprimierten Gase behalten in der ganzen Ausdehnung der Rohrleitung denselben Druck, sie dringen während

dieser Zugangsperiode in parallelen Massen vor, indem die erste Schicht durch die mechanische Wirkung des Kompressorkolbens vorgetrieben wird und die letzte Schicht mit dem Motorkolben in Berührung ist. Wenn die Temperatur an den beiden Endstellen dieselbe wäre, würden die unter vollem Druck komprimierten und im Motor absorbierten Volume identisch sein. Da die Temperatur im Motor jedoch tiefer ist, so ziehen sich die Gase zusammen und werden zum Teil flüssig. Die Volumenverminderung der Gase zufolge dieser beiden Ursachen, multipliziert mit dem Druck, stellt eine äußere Arbeit dar, die sich in dem Austauscher in Wärme verwandelt. Diese Wärme wird also dargestellt durch den Überschuß der spezifischen Wärme der Luft bei konstantem Druck über die spezifische Wärme bei konstantem Volumen, und durch die äußere Wärme der gesamten latenten Wärme, die für die bei — 131° unter dem Druck von 52 Atm. verflüssigte Luft berechnet ist. Die spezifische Wärme der in dem Austauscher aufsteigenden Luft ist ebenso mit einer äußeren Arbeit belastet, nämlich mit der Dilatationsarbeit, während die Luft sich wieder erwärmt, indem diese Luft gegen die äußere Atmosphäre wirkt.

Der soeben auseinander gesetzte Punkt ist von der größten Bedeutung für die Berechnung

des Nutzeffekts des Motors mit adiabatischer Entspannung.

Nachdem dies vorausgeschickt ist, sehen wir, daß wir das gesamte Diagramm in zwei gesonderte Teile zerlegen müssen: der erste ohne jede abkühlende Wirkung auf die Gase, der uns aber eine energische Arbeit auf das Stellkreuz des Motors liefert, der zweite, der beim Verschluß des Zulassungsventils beginnt und beim Herausgehen der Gase im Moment des Entweichens endet. Außer diesen beiden Perioden des Diagramms muß man, da die Gase noch mit einem Druck von ungefähr $2^{1}/_{2}$ Atm. herausgehen, die einfache Entspannung der Gase gegen Atmosphärendruck hinzufügen, eine Entspannung, die eine bemerkenswerte äußere Arbeit erzeugt und der Verflüssigung einer bestimmten Luftmenge entspricht. Die Berechnung dieser drei Perioden gibt die Arbeit des Motors und überdies die Arbeit gegen den atmosphärischen Druck nach dem Entweichen.

Berechnung der ersten Periode:

Oberfläche des Kolbens	88,243 cm
Unter vollem Druck vom Kolben durchlaufener Weg:	0,035 m
Druck in kg:	52 × 1,033
Zahl der Umdrehungen per Minute	160
Arbeit per Pferdekraftstunde	270000 kgmmtr.

Wir haben also in dieser ersten Periode eine von dem Motor gelieferte Arbeit:

$$\frac{88{,}243 \times 0{,}035 \times 52 \times 1{,}033 \times 60 \times 160}{270000} = 5{,}90 \, PS.$$

Diese Arbeit bringt, wie schon gesagt, keine Temperaturerniedrigung der Gase im Innern des Motors hervor.

Zweite Periode:

Um die zweite Periode zu berechnen, haben wir den vom Kolben zurückgelegten Weg in 10 Stufen geteilt, deren jede einen Teil der adiabatischen Entspannung darstellt. In der Berechnung jeder elementaren Periode betrachten wir den Druck als konstant.

Ein Teil der Flüssigkeit verdampft unter Absorbierung von Verdampfungswärme, woraus sich zwei gleichzeitige Wirkungen ergeben:

Zufolge der Verdampfung eines Teiles der Flüssigkeit vermindert sich der Druck nicht so stark, wie aus dem Mariotte'schen Gesetz folgen würde.

Zufolge der erzeugten Abkühlung vermindert die gesamte Gasmasse ihr Volumen.

Diese beiden Wirkungen erneuern sich in jedem elementaren Diagramm. Wir wollen hier nicht alle Einzelheiten reproduzieren, denn die Rechnungen sind äußerst langwierig, wir wollen nur die Summe der elementaren Arbeiten und die Lage am Ende des Laufes geben. Indessen wollen wir folgendes bemerken:

Die Wärmemenge, welche absorbiert wird, um die atmosphärische Luft teilweise zu verflüssigen, ist bekannt, nämlich 7836,8 Kalorien. Sie ist in der Form eines negativen Potentials in der Flüssigkeitsmenge, die verdampfen wird, aufgespeichert. Die Entspannungsarbeit der Gase auf den Kolben wird parallel wirken. In dem Zylinder wird sich also die Flüssigkeit vermindern, während die Temperatur der übrig bleibenden Flüssigkeit und der Gase beständig von —131° auf —182° herabgeht, eine Temperatur, die man durch den schließlichen Druck im Zylinder feststellt. In diesem Augenblick entweichen die Gase, drängen die atmosphärische Luft zurück und erniedrigen ihre Temperatur bis auf —194,5°, werden dabei teilweise flüssig, wobei dieser Teil zu demjenigen hinzukommt, der noch in dem Zylinder des Motors verbleibt. Die lange Berechnung der 10 Elemente der gesamten Arbeit der zweiten Periode gibt uns folgende numerische Lösung:

Mittlerer Druck	9,41 kg
Enddruck	3,964 kg
Anfangsdruck	52 Atm.

Arbeit der zweiten Periode:

$$\frac{0{,}315^{m} \times 9{,}41^{kg} \times 88{,}243 \times 60 \times 160}{270000}$$

Diese Arbeit ist gleich 9,3 Pferdekräften.

Der Motor erteilt also der Zentrifugalpumpe eine Gesamtarbeit von

1. Periode	5,90 PS.
2. Periode	9,3 PS.
	15,20 PS.

Die Gesamtarbeit beträgt also 15,20 Pferdestärken. Nur 9,3 PS. dienen hiervon zur Erzeugung flüssiger Luft im Zylinder. Dieser Punkt ist so wichtig, daß wir ihn noch einmal wiederholen.

Berechnung der dritten Periode:

Da die Gase aus dem Zylinder unter einem Druck von 3,964 Atm. herausgehen und sich gegen den atmosphärischen Druck entspannen, erzeugen sie eine meßbare äußere Arbeit. Um ihre Berechnung durchzuführen, muß man augenscheinlich zunächst die genaue Menge der erzeugten flüssigen Luft kennen, denn die gasförmige Luft allein entspannt sich gegen den Atmosphärendruck. Wir müssen also die Verluste an flüssiger Luft berechnen, denn die gebildete Flüssigkeit kompensiert sie beständig.

Berechnung der Verluste an flüssiger Luft:

Das bis zur Hälfte gefüllte Reservoir des Verflüssigers verliert durch Strahlung und Leitung 3,8 kg flüssiger Luft in der Stunde. Wenn wir die Verluste der verschiedenen Teile des Verflüssigers, während er funktioniert, ihren respektiven Oberflächen proportional setzen, so ergeben sich folgende Resultate:

1. Untere Hälfte des Reservoires des Verflüssigers	3,8	kg
2. Obere Hälfte desselben Reservoires	2,49	„
3. Zuführungsröhre der flüssigen Luft	1,60	„
4. Umhüllung des Motors	2,70	„
5. Austauscher (der Verlust als proportional den Oberflächen und den Temperaturabweichungen berechnet)	11,18	„
Summe der Verluste	21,77	kg
Die im Reservoir erhaltene Menge beträgt	52,70	kg
Mithin die stündliche Produktion	74,47	„

Wir haben also 74,47 kg flüssiger Luft produziert, von denen 21,77 kg dazu dienen, die Verluste zu kompensieren, welche zufolge der Unvollkommenheiten der Hüllen auftreten, durch welche die auf $-194{,}5^{0}$ abgekühlten Flächen geschützt werden sollen. Mithin ist die Menge Luft, welche den Motor in gasförmigem Zustande verläßt

$$651{,}271 - 74{,}47 = 576{,}80 \text{ kg}.$$

Im Moment des Herausgehens aus dem Motor ist der Druck dieser Gase 3,964 kg, und daher wird das Volum dieser 576,8 kg auf 127,330 cbm nach der Expansion, welche äußere Arbeit hervorbringt, reduziert.

Die noch auf 3,964 kg komprimierten Gase nahmen einen Raum von 42,9 cbm ein. Sie haben sich also entspannt um 127,330 cbm — 42,9 cbm gegen einen Druck von 10330 kg. Die Arbeit wird also durch den Ausdruck gegeben:

$$\frac{(127{,}330 - 42{,}900) \times 10330}{270000} = 3{,}23 \text{ PS.}$$

Wenn wir jetzt die gesamten Wirkungen des Motors und der Entspannung der Luft rekapitulieren, so finden wir folgendes:

1. Der Motor erteilt der Zentrifugalpumpe eine Arbeit von 15,20 PS.

2. Von dieser Arbeit dienen nur 9,3 PS. zur Abkühlung der Gase und zur Erzeugung von flüssiger Luft.

3. Die spontane Entspannung der nichtverflüssigten Gase beim Herausgehen aus dem Motor erzeugt eine Arbeit von 3,23 PS., die zur Herstellung von flüssiger Luft verwandt wird.

4. Die Summe der zur Herstellung von flüssiger Luft verwandten Arbeiten ist also

Zweite Periode	9,3 PS.
Periode der freien Entspannung	3,23 PS.
insgesamt	12,53 PS.

5. Wir wissen, daß diese 12,53 PS. erhalten worden sind durch die in dem Motor freigewordene Wärme, sowohl durch die spezifische

Wärme der Luft, deren Temperatur von —131° auf —194,5° gesunken ist, als durch die latente Wärme der Luft, die am Schluß der dritten Periode gebildet und im Motor vor den Verlusten erhalten wird.

Wir können also diese Resultate, welche die allgemeine Bilanz des Motors bei regelmäßigem Gange bilden, kontrollieren.

Die 651,271 kg komprimierte Luft sind in den Motor bei einer Temperatur von —131° eingetreten, und sie gehen mit einer Temperatur von —194,5 nach der letzten Entspannung gegen die atmosphärische Luft heraus. Die Wärme, welche sie verlieren, ist also durch den Ausdruck gegeben:

$$651{,}271 \text{ kg} \times 0{,}23751 \times (194{,}5 - 131)$$

Diese Wärme beträgt 9822 Kalorien. Wir wissen, daß eine bestimmte Menge flüssiger Luft in der Form eines negativen Potentials mit der gasförmigen Luft in den Motor gegangen ist.

Das negative Potential beträgt 7856 Kalorien. Überdies haben wir in dem Motor und seiner Umhüllung 74,47 kg flüssiger Luft fabriziert. Die hierbei absorbierte latente und in Arbeit verwandelte Wärmemenge ist

$$74{,}47 \times 82 = 6106{,}5 \text{ Kalorien.}$$

Nehmen wir die algebraische Summe dieser Wärmemengen, so haben wir:

Als latentes Potential zugeführte Wärme	7856 Kal.
Wegzunehmende Wärme, um die gesamte Luft auf —194,5° abzukühlen	—9822 „
Zur Verflüssigung von 74,47 Kilo Luft wegzunehmende Wärme	—6106,5 „
Die algebraische Summe ist gleich	—8072,5 Kal.

Wir haben in mechanische Arbeit genügend Wärme umgewandelt, um für die Zentrifugalpumpe und gegen die äußere Luft eine Arbeit von 12,53 PS. zu liefern. Verwandeln wir diese PS. in Kalorien, so hat man

$$\frac{12,53 \times 270000}{425} = 7962 \text{ Kalorien.}$$

Unsere Bilanz schließt also mit einer so geringen Abweichung (110 Kal.), daß die Verifikation so genau ist wie es unsere Beobachtungsmittel zulassen.

Diskussion der erhaltenen Resultate.

Die direkten Beobachtungen, welche wir mit unserm Motor angestellt haben, bestätigen in allen Punkten die numerischen Schlußfolgerungen unserer Rechnung. Nehmen wir z. B. die am 2. September 1906 erhaltenen Resultate.

Anstatt 500 cbm Luft stündlich zu komprimieren, haben wir nur 350 cbm Luft auf den

Druck von 53 Atm. komprimiert. Die Tourenzahl des Motors ist von 160 auf 138 in der Minute gefallen. Die Produktion der am Grunde des Verflüssigers effektiv erhaltenen flüssigen Luft betrug

27,9 kg flüssiger Luft per Stunde.

Der Barometerstand betrug 764 mm, der Austauscher war unter denselben Temperaturbedingungen genommen, 178 mm oben am Austauscher für die unter Druck eintretenden Gase, also —61° und 200 mm oben am Austauscher für die Herausgabe.

Die Temperatur vor der Entspannung der komprimierten Gase war gegeben durch 342 mm, was —127,5° C. entsprach. Der ganze Motor und seine Nebenteile sowie der ganze Austauscher befanden sich beim Betriebe mit 500 cbm unter identischen Temperaturverhältnissen. In der Tat hält die flüssige Luft alle diese Apparate auf —194,5°, wieviel flüssige Luft auch produziert wird. Der Verlust an flüssiger Luft per Stunde ist also merklich derselbe wie bei 500 cbm. Wir haben also als normalen Gang und tatsächliche Erzeugung flüssiger Luft im Motor und in der Umhüllung:

1. Erhaltene Produktion	27,9 kg
2. Stündlicher Verlust	21,77 „
Gesamte Produktion	49,67 kg

Vergleichen wir dieses Resultat mit demjenigen,

das beim Gange mit dem Kompressor von 500 cbm stündlich erhalten wird, so haben wir die Proportion $500 : 74{,}47 = 350 : x$

$$x = 52{,}13 \text{ kg}.$$

Augenscheinlich vermindert sich der effektive Ertrag stets mit der Kraft des Motors; die Reibungen und unvermeidlichen Undichtigkeiten vermindern, so gering sie auch seien, doch den Ertragskoeffizienten des Motors. Indessen ist die Übereinstimmung zwischen Theorie und Erfahrung noch bis auf nahezu 5% vorhanden.

Diese Vergleiche beweisen, daß eine gute Isolierung der Apparate notwendig ist, um die sehr merklichen Verluste zufolge der Strahlung und der Leitung der schützenden Hüllen herabzumindern.

Sichere Erfahrungen über die wirklichen Ursachen der Erzeugung der flüssigen Luft.

Mittels unseres Apparates und einer elektrischen Lampe, welche den Herausgang der Gase aus dem Motor beleuchtet, kann man die Nichtigkeit der Theorie des Professors v. Linde über die Herstellung der flüssigen Luft durch die innere Arbeit der komprimierten Luft, eine Arbeit, die sich zeigt in der Temperaturerniedrigung im Moment der Entspannung, deutlich beweisen. Da diese Theorie von fast allen

Universitätsprofessoren, die ohne Diskussion dem Haupt der Schule folgen, angenommen ist und gelehrt wird, so ist es dringend notwendig, diesen experimentellen Beweis zu führen, ohne länger zu zögern. Wir führen den Beweis in folgender Weise:

Wir nehmen die Theorie des Professors v. Linde als richtig an, und die auf 50, 100 oder 150 Atm. komprimierte Luft trete oben in den Austauscher unter konstantem Druck und bei einer beliebigen Temperatur ein; je niedriger die Temperatur ist, um so beträchtlicher muß, nach der von Linde angenommenen Formel, die in der komprimierten Luft aufgespeicherte innere Arbeit sein. Nach Linde wird die Temperaturerniedrigung während der Entspannung dargestellt durch die Formel

$$\Theta^{\circ} = \frac{1}{4}(P' - P)\frac{(273)^2}{T}$$

Nehmen wir z. B. den Betrieb mit dem Kompressor von 500 cbm, wie wir ihn analysiert haben. Der Druck P' wird 52 Atm. sein. Der Druck P wird 1 Atm. sein. T ist die absolute Temperatur von —63,5° C., also 209,5°. Der Wert von Θ, also die Erniedrigung während der Entspannung, wird dann

$$\Theta = \frac{1}{4}(52 - 1)\frac{(273)^2}{209,5}$$

$$\Theta = 22,075^{\circ}.$$

Da diese Erniedrigung dem gesamten komprimierten Gase zukommt, würde der Ertrag an flüssiger Luft sein:

$$\frac{651{,}271 \times 0{,}23751 \times 22{,}075}{82} = 41{,}642 \text{ kg.}$$

Ziehen wir die notwendigen Verluste in denselben Apparaten ab, so würde man als reellen Ertrag haben

Produktion	41,642 kg
Verluste	21,77 „
im Reservoir	19,872 kg

Man müßte also unter diesen Bedingungen stündlich erhalten

19,872 kg flüssiger Luft.

Wir können nun leicht folgendes beweisen: Wenn man das Reservoir, das sich unten am Austauscher befindet, sich mit flüssiger Luft füllen läßt, sodaß die letzten Windungen in die gebildete Flüssigkeit tauchen, so hört die Produktion flüssiger Luft, selbst mit dem Motor, vollständig auf, obwohl man eine große Menge flüssiger Luft aus dem Motor herauskommen sieht. Die Arbeit des Motors wird allmählich geringer, wenn man den Druck auf 62 Atm. aufrecht erhält, indem man den Gang des Motors reguliert.

Dieses Resultat ist ein vollständiger Beweis der Tatsache, daß die innere Arbeit der komprimierten Luft Null ist, da ja die Luft fortfährt beständig unter demselben Druck und

derselben Temperatur einzutreten und unter demselben Druck und derselben Temperatur wie vorher aus dem Austauscher herauszugehen. Der Gasstrom, welcher in den Austauscher eintritt, und derjenige, welcher aus ihm herausgeht, sind konstant, also muß die Entspannung in diesen beiden Fällen dieselbe Wirkung hervorrufen.

Wenn die Flüssigkeit die Schlange umspült, so hört jede Produktion von flüssiger Luft auf, sowohl mit dem System Linde als mit dem Motor, es würde also eine Vernichtung dieser inneren Arbeit ohne jede Kompensation eintreten, was schlechterdings unmöglich ist.

Wenn man dagegen die Bildung der flüssigen Luft einzig durch die gelieferte äußere Arbeit erklärt, so erkennt man sofort, daß die gesamte Verflüssigung der Luft vor der Entspannung ipso facto die Produktion der äußeren Arbeit unterdrücken wird, da es ja Flüssigkeit ist, was herauskommt, und eine flüchtige Flüssigkeit durch ihre Druckänderung nicht mehr mit der Wirkung einer Gasmasse, welche diese Flüssigkeit darstellt, vergleichbar ist.

Der experimentelle Beweis dieser wichtigen Tatsache ist von uns während eines ununterbrochenen Ganges von 12 Stunden geliefert worden.

Die innere Arbeit der komprimierten Luft

bei den gewöhnlichen Temperaturen des normalen Ganges der Apparate des Professors von Linde ist also als Null bewiesen und ohne Wirkung bei der Herstellung der flüssigen Luft.

Als Ergänzung des Beweises fügen wir noch hinzu: Wenn man in der von Linde angewendeten Formel für T die absolute Temperatur der Luft im Moment der Entspannung nimmt, so würde man während des Eintauchens der letzten Windungen der Schlange in die gebildete Flüssigkeit eine um so beträchtlichere Temperaturerniedrigung haben, je vollständiger das Eintauchen wäre. Die Maschine müßte mehr und mehr Flüssigkeit liefern; in der Tat aber hört die Produktion des Apparates auf!

Diese Beweise sind so leicht, so bündig und so klar, um die falschen, über diese wichtige Frage auf den deutschen Universitäten vorgetragenen Ideen zu verbessern, daß es wohl angebracht wäre, eine Kommission von Physikern zu ernennen, um das Problem der Gewinnung flüssiger Luft durch die Kompression und Entspannung der Luft unter verschiedenen Drucken experimentell und theoretisch zu studieren, damit die wirkliche Ursache der Zustandsänderung dieses Gases bestimmt und die Diskussion über diese Frage vollständig durchgeführt werde.

Die Kommission könnte auch beauftragt werden, die physikalischen Bedingungen der methodischen Destillation der flüssigen Luft zu untersuchen, um die ungeheuerlichen Irrtümer zu beseitigen, welche über diese wichtige Frage bei einigen Industriellen verbreitet sind. Irrtümer, die durch ihre Propagierung die physikalische Wissenschaft bis zu den Lehrstühlen der Universitäten aller Länder verwirren.







